VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

ББК 31.294
К53
УДК 628.921.95

Рецензент *С. А. Клюев*

К $\frac{30310-125}{051(01)-81}$ 141—81(Э).2302060000 ББК 31.294 6П2.19

© Энергоиздат, 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

С установками искусственного освещения повседневно приходится сталкиваться всем, и из всех инженерных устройств они являются, пожалуй, наиболее массовыми. Их осуществление и эксплуатация требуют больших затрат материальных средств, электроэнергии и человеческого труда, но эти затраты с избытком окупаются тем, что обеспечивается возможность нормальной жизни и деятельности людей в условиях отсутствия или недостаточности естественного освещения. Более того, искусственное освещение решает ряд задач, вообще недоступных естественному освещению, от особенностей же устройства искусственного освещения, подчас кажущихся весьма незначительными, во многом зависят и производительность труда, и безопасность работы, и сохранность зрения, и архитектурный облик помещения.

В нашей стране, ведущей в небывалых масштабах промышленное и культурно-бытовое строительство, только в проектировании осветительных установок принимают участие многие тысячи специалистов, число же лиц, связанных с эксплуатацией освещения, не поддается даже приблизительной оценке.

Предлагаемая книга рассматривает вопросы проектирования, устройства и эксплуатации осветительных установок и в основном предназначена служить практическим пособием для работников проектных организаций, энергетиков промышленных предприятий и санитарных инспекторов. Примерно совпадая по своему содержанию с учебной программой курса «Осветительные установки», читаемого для студентов техникумов специализации 0632 «Осветительные приборы и установки», она может также служить учебным пособием по указанному курсу.

Назначение и объем книги заставляют подчеркнуть, что она никоим образом не является курсом светотехники вообще и рассчитана на лиц, знакомых с основами светотехники, а также имеющих общие сведения об источниках света и осветительных приборах. Лишь в порядке краткого напоминания в начале книги приведен перечень основных понятий и соотношений светотехники.

Не следует рассматривать книгу и как справочное пособие: объем справочных материалов, необходимых только для проектирования освещения, превышает весь объем данной книги, а их частая изменчивость оправдывает сложившуюся практику выделения их в самостоятельные издания.

Достаточно частым изменениям подвергаются и некоторые нормативно-руководящие материалы, поэтому автор старался, насколько возможно, больше внимания уделять принципиальной стороне вопросов, а не пересказу официальных требований и рекомендаций.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

1-1. ОСНОВНЫЕ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И СООТНОШЕНИЯ

В результате преобразования подводимой к телам энергии, в частности тепловой или электрической, в ряде случаев возникает электромагнитное излучение, количественно характеризующееся мощностью — лучистым потоком. Та часть лучистого потока, которая воспринимается зрением человека как свет, называется световым потоком Φ и измеряется в люменах (лм).

Световой поток может быть различно распределен в пространстве. Интенсивность его излучения в любом направлении характеризуется силой света I, определяемой отношением светового потока к телесному углу ω, в пределах которого он распространяется:

$$I = \Phi/\omega. \tag{1-1}$$

В свою очередь телесный угол определяется отношением площади S, вырезаемой им из сферы произвольного радиуса R, к квадрату последнего:

$$\omega = S/R^2. \tag{1-2}$$

Полный телесный угол пространства, окружающего точку, равен 4π ср (стерадиан); телесный угол каждой из полусфер, верхней и нижней, равен 2π ср. Единица силы света — кандела (кд) — это световой поток в люменах (лм), испускаемый точечным источником в телесном угле 1 ср (лм/ср). Понятие силы света приложимо только к точечным источникам, размеры которых малы по сравнению с расстоянием до них.

Падая на поверхность площадью S, световой поток Φ создает ее освещенность E, определяемую соотношением:

$$E = \Phi/S. \tag{1-3}$$

Единица освещенности — люкс (лк) — это освещенность поверхности площадью 1 м^2 световым потоком 1 лм (лм/м^2). Освещенность поверхности не зависит от ее световых свойств.

Зрительное восприятие в основном определяется яркостью L равномерно светящейся плоской поверхности площадью 1 м^2

кривые имеют резко выраженный максимум: для колбочек $\lambda = 0{,}555$ мкм (дневное зрение); для палочек $\lambda = 0{,}515$ мкм (ночное зрение). Причем палочки, в отличие от колбочек, вообще не различают цветов.

Очень велик диапазон светочувствительности глаза, в котором он сохраняет работоспособность. Подсчитано, что наименьшее пороговое ощущение света человек получает при лучистой энергии, нагревающей 1 г воды на 1 К за 60 млн. лет; наибольшее пороговое ощущение, которое еще безопасно для глаза, происходит при той же лучистой энергии, но выделяемой за 1/2 ч. Таким образом, кратность предельных значений мощности достигает тысячи миллиардов.

При очень малых уровнях яркости диссоциация светочувствительного вещества в нервных окончаниях происходит редко, но так как палочки «включены параллельно» большими группами, то на малые яркости реагируют именно они, а не колбочки, «включенные поодиночке». Напротив, при высоких яркостях колбочки работают хорошо, палочки же почти выключаются из работы, так как быстрый расход светочувствительного вещества не компенсируется его медленной регенерацией.

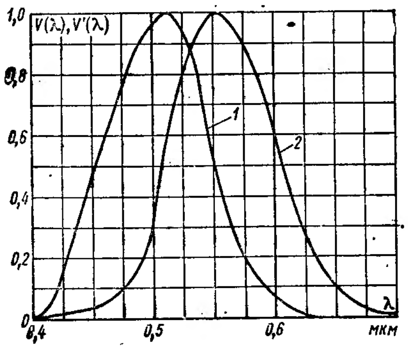

Рис. 1-3. Кривые спектральной чувствительности

Отсюда ясно, что имеют место дневное, ночное и сумеречное зрение. Дневное зрение — зрение нормального глаза при адаптации его к уровням яркости, начиная примерно с 10 кд/м², т. е. освещенность поверхности с коэффициентом отражения 0,6 не менее 50 лк; ночное зрение — при яркости менее 0,01 кд/м², т. е. при освещенности не более 0,05 лк той же поверхности. В промежутке существует область, где происходит главный переход от одного вида зрения к другому, т. е. имеет место «сумеречное» зрение.

Различие спектральной чувствительности палочек и колбочек вызывает еще одно явление, известное под названием «эффекта Пуркине». Это явление проявляется при переходе от дневного к ночному зрению и заключается в том, что происходит уменьшение светлоты красного света по сравнению со светлотой синего света, когда яркости уменьшены в одинаковой пропорции без изменения спектрального состава. (Хотя цвета при этом не различаются, но относительно более яркими кажутся синие, красные тона — более темными, почти черными.)

Приспособление глаза к различению данного объекта в данных условиях осуществляется путем трех процессов, происходящих без участия воли человека:

1) аккомодация, т. е. изменение кривизны хрусталика таким образом, чтобы изображение предмета оказалось в плоскости сетчатки («наводка на фокус»);

2) конвергенция, т. е. поворот осей зрения обоих глаз так, чтобы они пересекались на объекте различения;

3) адаптация, т. е. приспособление глаза к данному уровню яркости.

Для техники освещения имеет особое значение процесс адаптации, и именно ему глаз обязан столь широким диапазоном своей работоспособности. Хорошо известно, что при переходе из светлого помещения в темное способность различать детали возникает медленно и постепенно и, наоборот, при выходе из темного помещения на яркий свет первоначально возникает состояние ослепленности.

Процесс адаптации глаза к повышенной яркости заключается в изменении площади зрачка («зрачковый рефлекс», особенно хорошо заметный у кошек), подавлении палочек и уменьшении количества светочувствительного вещества в колбочках, а при высоких яркостях — частичном экранировании нервных окончаний клетками пигментного эпителия, расположенного в глубине сетчатки. При адаптации глаза к малым яркостям происходят обратные явления.

При переходе от высоких яркостей к практической темноте процесс адаптации происходит медленно и заканчивается за 1—1,5 ч. Обратный процесс идет быстрее и длится 5—10 мин. В обоих случаях речь идет о «полной переадаптации»; при изменении яркости не более чем в 5—10 раз переадаптация происходит практически мгновенно. Следует помнить, что в период осуществления адаптации глаз работает с пониженной работоспособностью, поэтому необходимо избегать создания условий, требующих частой и «глубокой» переадаптации.

Применительно к работе зрительного аппарата известный психофизический закон Вебера—Фехнера утверждает, что как равные воспринимаются приращения яркости, одинаковые не по своему абсолютному значению, а по их отношению к исходному уровню яркости, т. е. не равные ΔL, а равные $\Delta L : L$. Отсюда может быть сделан вывод, что уровень зрительного ощущения пропорционален не яркости, а ее логарифму. В силу ряда причин фактическая зависимость зрительного ощущения (т. е. так называемой «светлоты») от яркости более сложна, однако в первом приближении можно считать, что светлота возрастает в арифметической прогрессии при возрастании яркости в геометрической прогрессии.

В этом отношении характерно, что хотя между освещенностями 150 и 30 лк пятикратная разница, но при некоторых опросах наблюдатели признавали первую из этих освещенностей удовлетворительной, а вторую — лишь «несколько недостаточной». Если в установках архитектурного освещения хотим получить бросающуюся в глаза разницу яркостей двух поверхностей («световой акцент»), то надо, чтобы эти яркости отличались в несколько раз.

Работоспособность глаза характеризуется несколькими показателями. Они теснейшим образом связаны между собой и лишь в порядке общего ознакомления с ними рассмотрим их по отдельности.

Деталь (д) различима на фоне (ф), если она отличается от него по яркости или по цветности. Ограничим рассмотрение яркостным контрастом; некоторые сведения о цветовом контрасте даны в § 1-4.

в перпендикулярном к ней направлении при силе света 1 кд; определяющее уравнение $L = I/S$ является частным случаем более общего уравнения

$$L = \frac{I}{S \cos \alpha}. \quad (1\text{-}4)$$

Единица яркости — кандела на квадратный метр (кд/м²). Яркость освещенных поверхностей зависит от их световых свойств, от степени освещенности, а в большинстве случаев также от угла, под которым поверхность рассматривается.

В расчетах иногда фигурирует светимость M, равная отношению светового потока, отражаемого или пропускаемого поверхностью, к ее площади:

$$M = \Phi/S. \quad (1\text{-}5)$$

Световая лучеиспускаемость измеряется в люменах на квадратный метр и равна освещенности, умноженной на коэффициент отражения или коэффициент пропускания поверхности.

Световые свойства поверхностей характеризуются коэффициентами отражения ρ, пропускания τ и поглощения a, причем во всех случаях $\rho + \tau + a = 1$.

Поверхности, яркость которых в отраженном или пропущенном свете одинакова во всех направлениях, называются диффузными. Для них имеют место соотношения:

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha = LS \cos \alpha; \quad (1\text{-}6)$$

$$\Phi = I_0 \pi = LS\pi; \quad (1\text{-}7)$$

$$L = \frac{E\rho}{\pi} \quad \text{или} \quad L = \frac{E\tau}{\pi}. \quad (1\text{-}8)$$

Здесь I_0 — сила света в направлении нормали к поверхности, I_α — то же, под углом α к нормали.

Близки по свойствам к диффузным поверхностям и часто приравниваются к последним в отраженном свете матовые поверхности бумаги, ткани, дерева, необработанные металлы, побеленные поверхности и штукатурка; в проходящем свете — только молочные стекла.

Поверхности, не являющиеся диффузными, характеризуются коэффициентом яркости β, равным отношению яркости поверхности в данном направлении к яркости в тех же условиях диффузной поверхности, имеющей $\rho = 1$. Яркость недиффузных поверхностей может быть определена по формуле (1-8) с заменой ρ на β.

Зависимость силы света I_α от меридионального угла α (угол между даным направлением и вертикалью) задается или в табличной форме или в виде кривой силы света, т. е. геометрического места концов отрезков, изображающих в принятом масштабе значения силы света в различных направлениях (примеры кривых силы света даны в § 2-6). Для сопоставимости кривые силы света

осветительных приборов чаще всего относятся к потоку установленной в них лампы (или суммарному потоку нескольких ламп) 1000 лм.

Излучатели, у которых кривые силы света одинаковы для всех меридиональных плоскостей, называются круглосимметричными. Светораспределение большинства светильников с трубчатыми лампами имеет две взаимно перпендикулярные плоскости симметрии и характеризуется, соответственно, продольной и поперечной кривыми силы света.

В ряде случаев для разного рода анализов удобно пользоваться математическим выражением зависимости $I_\alpha = f(\alpha)$. Так, светораспределение диффузной плоской поверхности любой формы, а также плоского выходного отверстия светильников с диффузными отражателями изображается зависимостью

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha; \quad (1\text{-}9)$$

светораспределение диффузного шара или математической точки

$$I_\alpha = I_0; \quad (1\text{-}10)$$

светораспределение диффузного полушара с несветящим основанием

$$I_\alpha = I_0 \frac{1 + \cos \alpha}{2}; \quad (1\text{-}11)$$

светораспределение диффузного вертикального цилиндра с несветящимися основаниями

$$I_\alpha = I_{90} \sin \alpha. \quad (1\text{-}12)$$

Светораспределение многих реальных светильников может быть приближенно выражено уравнением

$$I_\alpha = I_0 \cos^m \alpha, \quad (1\text{-}13)$$

где m — эмпирически определяемый показатель, с увеличением которого возрастает степень концентрации светового потока в направлениях, примыкающих к вертикали.

При круглосимметричном светораспределении поток может быть определен по известным значениям силы света. Определение производится отдельно для каждой из кольцевых зон, ограниченных углами α_1 и α_2, путем умножения силы света в направлении середины зоны на телесный угол зоны. Для принятой шкалы границ зон 0—10; 10—20; ...; 80—90; ...; 170—180° значения телесных углов соответственно равны 0,095—0,283—0,463—0,628—0,774—0,897—0,992—1,058—1,091 ср (в верхней полусфере — те же значения в обратном порядке).

Таким образом,

$$\Phi_{0-180} = I_5 \omega_{0-10} + I_{15} \omega_{10-20} + \ldots + I_{175} \omega_{170-180}. \quad (1\text{-}14)$$

Для светильников с трубчатыми лампами, светораспределение которых имеет две плоскости симметрии, определение светового потока по кривым силы света производится в следующем порядке.

Сила света в направлениях 5, 15, 25, ..., 85° продольной плоскости умножается на следующие значения телесного угла: 0,0303—0,0294—0,0276—0,0249—0,0215—0,0174—0,0129—0,0079—0,0027 ср. Делением удвоенной суммы произведений на осевую силу света находится вспомогательный коэффициент k_f. Находится сумма значений сил света ΣI_α в направлениях 5, 15, ..., 85° поперечной плоскости, после чего искомый поток нижней полусферы рассчитывается по выражению

$$\Phi_{\smile} = 2k_f \sum I_\alpha. \qquad (1\text{-}15)$$

Аналогично определяется поток верхней полусферы.

В случаях когда зависимость $I_\alpha = f(\alpha)$ задана аналитически, световой поток оказывается равным: πI_0 — для диффузной плоскости, $4\pi I_0$ — для диффузного шара, $2\pi I_0$ — для диффузного полушара, $\pi^2 I_{90}$ — для диффузного цилиндра. При светораспределении, отвечающем условию (1-13),

$$\Phi = \frac{2\pi I_0}{m+1}. \qquad (1\text{-}16)$$

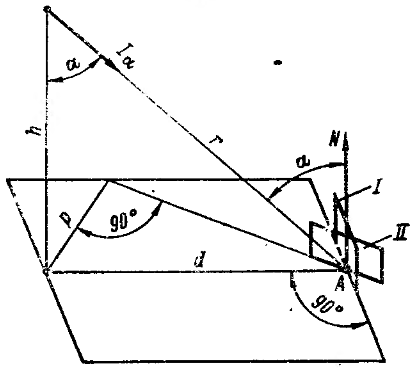

Рис. 1-1. Освещенность точки

Во многих случаях расчета освещенность точки той или иной поверхности определяется по силе света источника, с которой она связана соотношением

$$E = \frac{I_\alpha \cos\alpha}{r^2}, \qquad (1\text{-}17)$$

где E — освещенность, лк; I — сила света, направленная к точке, кд; α — угол между лучом и нормалью к поверхности в точке падения луча; r — расстояние от источника света до точки, м. Для точки A, принадлежащей горизонтальной поверхности (рис. 1-1), выражение (1-17) можно записать в следующем виде:

$$E = \frac{I_\alpha \cos^3\alpha}{h^2} = \frac{I_\alpha h}{r^3} = \frac{I_\alpha \cos\alpha \sin^2\alpha}{d^2}. \qquad (1\text{-}18)$$

В ряде случаев освещенность негоризонтальной поверхности удобно определять умножением освещенности горизонтальной поверхности на переходный коэффициент ψ. Значение последнего определяется на основании теоремы о том, что освещенности в общей точке двух поверхностей относятся как длины перпендикуляров, опущенных из источника света на каждую из этих поверхностей (больше освещенность той поверхности, для которой перпендикуляр длиннее). Для вертикальной плоскости I на рис. 1-1, перпендикулярной проекции освещающего ее луча, $\psi = \operatorname{tg}\alpha$, в общем случае для плоскости II $\psi = p : h$.

1-2. ЗРЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

С помощью зрения человек получает подавляющую часть информации, поступающей из окружающего мира.

Светооптическая часть глаза состоит в основном из двояковыпуклой линзы — хрусталика, диафрагмированного отверстием

в радужной оболочке — зрачком. Хрусталик создает на светочувствительной поверхности сетчатки, устилающей глазное дно, действительное, уменьшенное, обратное изображение фиксируемых предметов.

Схема получения этого изображения представлена на рис. 1-2. Если яркость предмета L, а площадь его проекции на плоскость, перпендикулярную оси зрения, S, то к глазу направлена сила света LS. При расстоянии до предмета R и площади зрачка q на зрачок падает световой поток $\Phi = LSq : R^2$; до сетчатки доходит тот же поток, умноженный на общий коэффициент пропускания τ глазных сред. Этот поток распределяется по площади изображения предмета s, которая при фокусном расстоянии глаза f определяется соотношением $s = Sf^2 : R^2$ и создает в соответствующем месте сетчатки освещенность $E = \Phi : s = L\tau q : f^2$. Считая очевидным, что зрительное ощущение определяется освещенностью сетчатки, приходим к выводу, что оно зависит от яркости объекта и не зависит, в частности, от его удаленности.

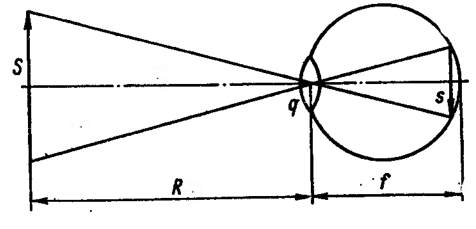

Рис. 1-2. Получение изображения на сетчатке глаза

Сетчатая оболочка (сетчатка) — светочувствительная оболочка, выстилающая глазное дно. Сетчатка имеет сложное строение, состоящее собственно из приемников света (палочек и колбочек) и нервных клеток, от которых возбуждение передается зрительному нерву, который связывает глазное яблоко с головным мозгом. Всего сетчатка содержит примерно 130 000 000 палочек и 7 000 000 колбочек, которые различаются как по своей форме, так и по свойствам. Одновременно с расходованием светочувствительного вещества происходит процесс его регенерации.

На оптической оси глаза расположена центральная ямка (от ее латинского названия fovea centralis происходит термин «фовеальное зрение», в отличие от «периферийного»), в которой сосредоточены только колбочки. Угловой размер этой ямки около 1,5°. Она является центром «желтого пятна», в пределах которого колбочки преобладают, но концентрация их уменьшается в направлении к периферии, концентрация же палочек, наоборот, возрастает. Вне желтого пятна резко преобладают палочки.

Палочки присоединены к волокнам зрительного нерва большими группами, т. е., образно говоря, включены параллельно, колбочки присоединены к этим волокнам по отдельности (в пределах центральной ямки) либо по нескольку штук. Благодаря этому четкое различение достигается лишь фовеальным зрением.

Процесс регенерации светочувствительного вещества происходит в палочках значительно медленнее, чем в колбочках, различна также чувствительность тех и других к различным длинам волн воспринимаемого излучения. На рис. 1-3 представлены кривые относительной спектральной эффективности излучения для дневного $[V(\lambda)]$ и ночного $[V'(\lambda)]$ зрения. В обоих случаях

месте. Чтобы оценить его значение в реальных случаях, вводится коэффициент сверхпорогового контраста c (примерно 1,8—2). Так как зависимость зрительного процесса от яркости носит логарифмический характер, удобно и видимости придать логарифмическую шкалу. Наконец, чтобы на границе «вижу — не вижу» значение видимости оставалось равным единице, в уравнение видимости вводится множитель 10 и ее окончательное выражение получает вид

$$V = \lg \frac{10K}{cK_{пор}},$$

где K — контраст, фактически имеющий место; $K_{пор}$ — пороговый контраст для того же объекта различения (чтобы не усложнять изложения мы не рассматриваем здесь вероятности различения p).

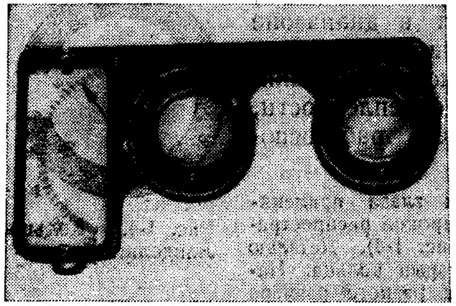

Рис. 1-5. Измеритель видимости

Для каждого данного объекта различения может быть определено предельное максимальное значение видимости, соответствующее таким условиям освещения, при которых пороговый контраст достигает минимального значения ξ:

$$V_{max} = \lg \frac{10\,K}{c\xi},$$

Степень соответствия данных осветительных условий тем, при которых пороговый контраст достигает минимума, характеризуется значением относительной видимости

$$V_o = V/V_{max},$$

которая в данное время может считаться наиболее удобным критерием для оценки осветительных условий.

Для измерения видимости в разное время предлагались и применялись различного рода приборы (визибилитиметры и запасомеры), основанные на том, что видимость доводилась до пороговой путем помещения между объектом или дополнительной яркости, уменьшающей контраст, или нейтрального («серого») светофильтра, уменьшающего яркость. В нашей стране получил распространение бинокулярный измеритель видимости, разработанный Л. Л. Дашкевичем (рис. 1-5).

В каждое из отверстий прибора вмонтированы двупреломляющая призма и поляроид. Первая дает два изображения детали, образованные пучками света, поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях. При повороте оправы согласованно поворачиваются поляроиды обоих отверстий, в результате чего яркость фона остается постоянной, но одно из изображений детали усиливается, а другое ослабевает. Когда видимость одного изображения доведена до пороговой, по шкале прибора прочитывается видимость в условных единицах. При фактической яркости фона L показания прибора будут составлять $0{,}35L$ вследствие поглощения света оптикой прибора.

До сих пор мы говорили о характеристиках зрения как о статических, относящихся к определенному моменту наблюдения. Динамика их изменения за время работы может служить важной характеристикой трудности зрительной задачи и условий освещения. Чаще, однако, для этой цели используется особая характеристика — устойчивость ясного видения (УЯВ). Если глаз достаточно долго фиксирует деталь, находящуюся на пороге различимости, то периоды отчетливого видения непроизвольно чередуются с паузами, когда деталь не различается. В качестве объекта различения выбирается кольцо Ландольта, размер которого и расстояние до глаз подбираются так, чтобы разрыв кольца был еле различим.

Наблюдателю предлагается фиксировать это кольцо в течение 180 с и в моменты, когда разрыв виден, называть букву «с», когда же он не различается — букву «о». Экспериментатор подсчитывает суммарное время различения разрыва и определяет у. я. в. как отношение этого времени ко всей длительности опыта, т. е. к 180 с.

Снижение у. я. в. в продолжение работы дает количественное суждение о степени зрительного утомления.

1-3. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ

Уровень зрительных характеристик и психологическое восприятие окружения определяются яркостью как рабочих поверхностей, так и всего поля зрения, и, казалось бы, было правильно выбрать именно яркость в качестве основной нормируемой величины.

В практике это создало бы, однако, значительные трудности, так как в поле зрения одновременно находятся поверхности, имеющие самые различные коэффициенты яркости, к тому же обычно точно неизвестные, а в разные моменты времени могут фиксироваться рабочие поверхности, обладающие различными свойствами. Нормирование яркости привело бы, например, к тому, что освещенность для чтения пришлось бы устанавливать в зависимости от качества бумаги, на которой отпечатана книга. Поэтому общепринятым в мировой практике является нормирование освещенности, значение которой, однако, устанавливается с учетом отражающих свойств рабочих поверхностей.

Нормирование освещения существенно отличается от нормирования других физических факторов внешней среды, например температуры. Человек чувствует себя хорошо в пределах изменения последней примерно от 18 до 22 °С, и нормирование теплового режима помещений не встречает особых затруднений, с освещенностью же дело обстоит совершенно иначе.

Можно, хотя и не рекомендуется, длительно читать книжный текст уже при освещенности 0,1 лк; можно, но также не рекомендуется, выполнять эту работу при ярком солнечном свете, когда освещенность превышает 50 000 лк. Установить в этих пределах норму освещенности — задача очень сложная, и, хотя этому

кривые имеют резко выраженный максимум: для колбочек $\lambda = 0{,}555$ мкм (дневное зрение); для палочек $\lambda = 0{,}515$ мкм (ночное зрение). Причем палочки, в отличие от колбочек, вообще не различают цветов.

Очень велик диапазон светочувствительности глаза, в котором он сохраниет работоспособность. Подсчитано, что наименьшее пороговое ощущение света человек получает при лучистой энергии, нагревающей 1 г воды на 1 К за 60 млн. лет; наибольшее пороговое ощущение, которое еще безопасно для глаза, происходит при той же лучистой энергии, но выделяемой за 1/2 ч. Таким образом, кратность предельных значений мощности достигает тысячи миллиардов.

При очень малых уровнях яркости диссоциация светочувствительного вещества в нервных окончаниях происходит редко, но так как палочки «включены параллельно» большими группами, то на малые яркости реагируют именно они, а не колбочки, «включенные поодиночке». Напротив, при высоких яркостях колбочки работают хорошо, палочки же почти выключаются из работы, так как быстрый расход светочувствительного вещества не компенсируется его медленной регенерацией.

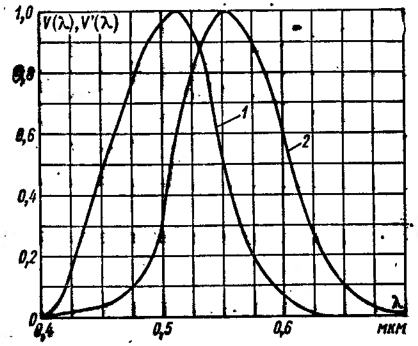

Рис. 1-3. Кривые спектральной чувствительности

Отсюда ясно, что имеют место дневное, ночное и сумеречное зрение. Дневное зрение — зрение нормального глаза при адаптации его к уровням яркости, начиная примерно с 10 кд/м^2, т. е. освещенность поверхности с коэффициентом отражения 0,6 не менее 50 лк; ночное зрение — при яркости менее 0,01 кд/м^2, т. е. при освещенности не более 0,05 лк той же поверхности. В промежутке существует область, где происходит главный переход от одного вида зрения к другому, т. е. имеет место «сумеречное» зрение.

Различие спектральной чувствительности палочек и колбочек вызывает еще одно явление, известное под названием «эффекта Пуркине». Это явление проявляется при переходе от дневного к ночному зрению и заключается в том, что происходит уменьшение светлоты красного света по сравнению со светлотой синего света, когда яркости уменьшены в одинаковой пропорции без изменения спектрального состава. (Хотя цвета при этом не различаются, но относительно более яркими кажутся синие, красные тона — более темными, почти черными.)

Приспособление глаза к различению данного объекта в данных условиях осуществляется путем трех процессов, происходящих без участия воли человека:

1) аккомодация, т. е. изменение кривизны хрусталика таким образом, чтобы изображение предмета оказалось в плоскости сетчатки («наводка на фокус»);

2) конвергенция, т. е. поворот осей зрения обоих глаз так, чтобы они пересекались на объекте различения;

3) адаптация, т. е. приспособление глаза к данному уровню яркости.

Для техники освещения имеет особое значение процесс адаптации, и именно ему глаз обязан столь широким диапазоном своей работоспособности. Хорошо известно, что при переходе из светлого помещения в темное способность различать детали возникает медленно и постепенно и, наоборот, при выходе из темного помещения на яркий свет первоначально возникает состояние ослепленности.

Процесс адаптации глаза к повышенной яркости заключается в изменении площади зрачка («зрачковый рефлекс», особенно хорошо заметный у кошек), подавлении палочек и уменьшении количества светочувствительного вещества в колбочках, а при высоких яркостях — частичном экранировании нервных окончаний клетками пигментного эпителия, расположенного в глубине сетчатки. При адаптации глаза к малым яркостям происходят обратные явления.

При переходе от высоких яркостей к практической темноте процесс адаптации происходит медленно и заканчивается за 1—1,5 ч. Обратный процесс идет быстрее и длится 5—10 мин. В обоих случаях речь идет о «полной переадаптации»; при изменении яркости не более чем в 5—10 раз переадаптация происходит практически мгновенно. Следует помнить, что в период осуществления адаптации глаз работает с пониженной работоспособностью, поэтому необходимо избегать создания условий, требующих частой и «глубокой» переадаптации.

Применительно к работе зрительного аппарата известный психофизический закон Вебера—Фехнера утверждает, что как равные воспринимаются приращения яркости, одинаковые не по своему абсолютному значению, а по их отношению к исходному уровню яркости, т. е. не равные ΔL, а равные $\Delta L : L$. Отсюда может быть сделан вывод, что уровень зрительного ощущения пропорционален не яркости, а ее логарифму. В силу ряда причин фактическая зависимость зрительного ощущения (т. е. так называемой «светлоты») от яркости более сложна, однако в первом приближении можно считать, что светлота возрастает в арифметической прогрессии при возрастании яркости в геометрической прогрессии.

В этом отношении характерно, что хотя между освещенностями 150 и 30 лк пятикратная разница, но при некоторых опросах наблюдатели признавали первую из этих освещенностей удовлетворительной, а вторую — лишь «несколько недостаточной». Если в установках архитектурного освещения хотим получить бросающуюся в глаза разницу яркостей двух поверхностей («световой акцент»), то надо, чтобы эти яркости отличались в несколько раз.

Работоспособность глаза характеризуется несколькими показателями. Они теснейшим образом связаны между собой и лишь в порядке общего ознакомления с ними рассмотрим их по отдельности.

Деталь (д) различима на фоне (ф), если она отличается от него по яркости или по цветности. Ограничим рассмотрение яркостным контрастом; некоторые сведения о цветовом контрасте даны в § 1-4.

В зависимости от того, что светлее — деталь или фон, контраст определяется по формулам:

$$K = \frac{L_ф - L_д}{L_ф} \qquad \text{или} \qquad K \approx \frac{L_д - L_ф}{L_д}.$$

Некоторые авторы пользуются во всех случаях первой формулой, понимая под числителем абсолютное значение разности яркостей; тогда значение контраста лежит в пределах от 0 до ∞. Предпочтительно помещать в знаменатель бóльшую из яркостей и получать значения K в пределах от 0 до 1.

Наименьший различимый глазом контраст называется пороговым контрастом, обратная ему величина — контрастной чувствительностью.

При всех остальных наиболее благоприятных условиях глаз различает контраст начиная от 0,01—0,015, что соответствует контрастной чувствительности до 100 единиц.

Для того чтобы те или иные детали различались как отдельные, они должны быть разделены определенным промежутком. Наименьший размер последнего определяет разрешающую способность глаза. Последняя численно выражается как отношение наименьшего различаемого размера к расстоянию до глаза и измеряется в угловых или относительных единицах. Величина, обратная разрешающей способности глаза, называется остротой зрения. Нормальное зрение в благоприятных условиях имеет остроту около 3500 (разрешающая способность около 1′); у отдельных лиц острота зрения может быть и значительно больше.

Если глаз фиксирует одиночные, очень малые по сравнению с расстоянием до них, предметы, то как бы ни было мало их изображение на сетчатке, часть нервных окончаний получит повышенную или пониженную яркость по сравнению с соседними и это будет замечено. Таким образом с расстояния 1 м мы «видим» волос диаметром 0,1 мм, или, скорее, замечаем его присутствие; таким же образом видны звезды, которые даже в мощный телескоп кажутся точками, так как и в этом случае их изображение на сетчатке слишком мало, чтобы возбудить несколько волокон зрительного нерва.

Процесс вúдения происходит быстро, но все же не мгновенно. Время различения имеет значение для скорости работы, а иногда, будучи лимитированным обстоятельствами, играет решающую роль.

При условиях, близких к пороговым в отношении размера детали, контраста и времени, различение становится недостоверным и при многократном повторении опыта происходит только в части случаев. Поэтому наряду с другими параметрами рассматривается вероятность различения p.

Изучение характеристик работы глаза имеет большое значение и ему уделяется значительное внимание. Надо, однако, подчеркнуть тесную взаимную связь этих характеристик. Нельзя говорить о контрастной чувствительности вообще, не сопоставляя ее значений с определенным размером деталей, времени и вероятности различения. То же относится и к остальным характеристикам. Поэтому более правильно говорить о существовании некоторой обобщенной функции

$$V_к = f(\alpha, L, t, p),$$

где $V_к$ — контрастная чувствительность; α — угол различения; L — яркость; t — время различения; p — вероятность различения.

Для техники освещения особое значение имеет зависимость характеристик работы глаза от яркости фона L. Все показатели, характеризующие работоспособность глаза, повышаются с ростом яркости сначала быстро, потом замедленно, постепенно достигая предельного уровня. В зависимости от того, какая функция исследуется, а также от значения параметров, поддерживаемых в процессе опыта неизменными, стабилизация яркости наступает в диапазоне 10—1000 кд/м², что соответствует освещенности 50—5000 лк. При чрезмерном увеличении яркости наступает состояние ослепленности, характеризующееся понижением работоспособности глаза.

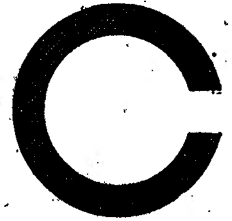

Рис. 1-4. Кольцо Ландольта

Для исследования характеристик глаза применяются различные тесты, из которых широкое распространение получили кольца Ландольта (рис. 1-4). Деталью различения в этом случае является разрыв кольца. Наблюдателю предлагается набор колец разного размера (или по-разному контрастирующих с фоном) и с различной ориентацией разрыва. Самое малое или самое малоконтрастное кольцо, для которого наблюдатель может указать место разрыва, определяет значение исследуемой функции. Для той же цели применяются наборы букв разной величины, специальные таблицы — миры с различной штриховкой. Для определения скорости различения применяются особые приборы — тахистоскопы, в которых между глазами наблюдателя и объектом (кольцом Ландольта) помещается падающая пластина или поворачивающийся диск с вырезом.

Наиболее современными характеристиками взаимосвязи условий освещения и работоспособности глаза являются видимость и относительная видимость.

В принципе видимость может быть определена как имеющееся в данных условиях значение той или иной характеристики глаза по сравнению с ее наименьшим уровнем, необходимым для решения данной зрительной задачи. Например, если по характеру работы необходима разрешающая способность глаза 500, а при данных условиях освещения она достигает 1500, то видимость равна 3. При видимости, равной 1, состояние глаза находится на границе «вижу — не вижу». Так как основной характеристикой глаза сейчас признается контрастная чувствительность, в данное время видимость принято определять именно по этой функции.

В применении к задачам нормирования освещения понятие видимости несколько усложняется. Пороговый контраст изучается в лабораторных условиях, на тренированных наблюдателях, ожидающих появления определенной детали в определенном

стадионов, чтобы увеличить прибыль, отбив посетителей у конкурентов.

В результате в данное время можно говорить только о нормах, которые, не будучи ни оптимальными, ни экономически наивыгоднейшими, лежат где-то между значениями минимума и оптимума. Уровень этих норм должен, очевидно, определяться технико-экономическими возможностями и повышаться по мере роста последних, что и происходит во всех странах, включая СССР. Таким образом, следует рассматривать существующие нормы освещенности как компромисс между желаемым и возможным.

Значительная часть исследований в области нормирования освещения посвящена обоснованию этих «промежуточных» норм, и именно здесь неизбежно принятие волевых решений, о которых было сказано ранее. Критерием для установления нормы могут быть определенные уровни видимости, относительной видимости, утомляемости, достоверности различения и т. д. Поскольку этот уровень выбран, относительно несложно построить всю шкалу освещенности, но самый выбор исходного уровня едва ли поддается строгому обоснованию.

В основу английского светотехнического кодекса 1961 г. были положены исследования зрительной работоспособности, выполненные Вестоном. Под зрительной работоспособностью здесь понимается произведение скорости различения на вероятность правильного опознавания. Для каждого тест-объекта эта величина зависит от условий освещения и при определенной освещенности достигает максимума. Отношение зрительной работоспособности в данных условиях к максимальной — относительная зрительная работоспособность — характеризует степень соответствия условий освещения оптимальным. Значение этого отношения было принято Вестоном равным 0,9.

Для этого случая и для среднего контраста, равного 0,25, эмпирически получено выражение для нормы освещенности:

$$E = \frac{1930}{\rho\alpha^{1,5}},$$

где ρ — коэффициент отражения фона; α — угловой размер различаемых деталей, ...′. Расчет по этой формуле дает значения освещенности в пределах от 76 лк при $\rho = 0,8$ и $\alpha = 10'$ до 19 300 лк при $\rho = 0,1$ и $\alpha = 1'$.

В США основная работа по нормированию освещения была выполнена Блекуэллом. При опытах производилось различение деталей определенного размера, причем требовалось, чтобы за 0,2 с эти детали различались с вероятностью 0,99.

При переходе от выводов лабораторных исследований к практическим рекомендациям введен так называемый коэффициент сверхпорогового контраста, учитывающий, что в реальных условиях многие обстоятельства становятся недействительными, так как в лаборатории испытывались наблюдатели с нормальным зрением, знавшие, когда где и какая деталь должна появиться.

Действующие в СССР нормы [1] определены исходя из обеспечения заданного значения относительной видимости (0,7), причем это значение, хотя и представляется разумным, строгого обоснования не имеет.

Каковы бы ни были показатели, положенные в основу норм освещенности, одинаковый уровень этих показателей для различных работ достигается при различных уровнях освещенности

и всякое нормирование должно дифференцированно учитывать характеристики зрительного процесса.

Такими характеристиками являются:

1) точность работы, т. е. либо наименьший угловой размер различаемых деталей, либо их линейный размер в сочетании с расстоянием, с которого они рассматриваются;

2) коэффициент отражения фона, на котором различаются детали, определяющий при данной освещенности его яркость;

3) контраст между деталями и фоном;

4) необходимость поиска деталей (в случае неопределенности места их появления) и наличие посторонних, отвлекающих деталей;

5) подвижность рабочей поверхности, затрудняющая различение деталей;

6) относительная длительность зрительного напряжения в продолжение рабочего времени. Этот фактор имеет очень большое значение. Периодически определять время по часам можно и при лунном свете, но непрерывный контроль того или иного процесса требует большого напряжения зрения. Чертежник, хотя и занят точной зрительной работой бóльшую часть рабочего времени, имеет возможность произвольных перерывов в работе для отдыха глаза, рабочий же, осматривающий изделия, непрерывно движущиеся по конвейеру, такой возможности лишен.

Не являются характеристиками зрительного процесса, но имеют значение и учитываются (или могут учитываться) при нормировании освещения также следующие факторы:

1) опасность прикосновения к предметам, находящимся в рабочей зоне: режущему инструменту, токоведущим частям и т. п.;

2) наличие в поле зрения самосветящихся поверхностей, резко контрастирующих с фоном; контраст, в данном случае вредный, может быть уменьшен, если яркость и детали и фона увеличить в одно и то же число раз, т. е. сильно осветить рабочее место;

3) повышенные санитарно-гигиенические требования к работе;

4) отсутствие или недостаточность естественного освещения, что может быть отчасти компенсировано увеличением освещенности искусственного освещения;

5) возраст работающих; с одной стороны, зрение детей и подростков желательно поставить в наиболее благоприятные условия, с другой стороны, как показали некоторые исследования, с возрастом увеличивается потребность в освещении, уже к 30 годам повышаясь в 1,5 раза.

Возможны и осуществляются две системы построения норм: составление значений освещенностей для конкретно поименованных рабочих мест и помещений или составление таблицы, в которой освещенность дается в функции признаков, характеризующих зрительный процесс, без указания конкретных рабочих мест.

Первая система позволяет наиболее полно учесть все индивидуальные особенности каждого производственного процесса, но

вопросу посвящены сотни исследований, все реализованные до сих пор предложения в той или иной степени основаны на волевых решениях. Вместе с тем важность нормирования освещенности неоспорима и определяется, с одной стороны, теми затратами, которых требует устройство и эксплуатация освещения, с другой — гигиеническим, производственным и экономическим эффектом, который достигается хорошим освещением.

В силу этого во всех развитых странах существуют нормы освещения, в ряде случаев имеющие силу закона или стандарта. В СССР в 1928 г. утверждены первые в мире обязательные нормы освещенности, составленные проф. П. М. Тиходеевым.

Обратимся снова к диапазону освещенности, в пределах которого возможно, в частности, чтение (точнее — работа, по зрительной сложности равноценная чтению, например корректура). Будем повышать освещенность начиная с 0,1 лк. Условия зрительной работы будут улучшаться, это вызовет снижение утомления, как зрительного, так и общего, и увеличение скорости работы. Настанет момент, начиная с которого утомление не будет превышать пределов, принятых за допустимые, и работоспособность будет восстанавливаться после отдыха. Такую освещенность можно назвать гигиеническим минимумом, и для чтения она была определена П. М. Тиходеевым равной 50 лк. С дальнейшим ростом освещенности будет происходить дальнейшее улучшение условий труда, и так будет продолжаться до момента, о котором можно сказать: меньшая освещенность — хуже, но и бóльшая — уже не лучше, если не хуже. Такую освещенность можно назвать оптимальной, и ее не так уж сложно определить методом экспертных оценок или путем изучения производственно-гигиенических или физиологических показателей. Здесь, правда, еще не все ясно, так как за основу могут быть приняты различные показатели, дающие не совпадающие результаты.

Укажем, что в ФРГ были проведены исследования для работ средней точности, причем наименьшее утомление наблюдалось при освещенности около 1200 лк, рост же производительности труда не прекращался и при освещенности 2000 лк. В некоторых других исследованиях оптимальная освещенность для работ средней точности также оказывалась в диапазоне 1500—2000 лк, так что хотя бы о порядке этого значения можно говорить с достаточной уверенностью. Очевидно, оптимальную освещенность следует рассматривать как верхний предел возможных норм освещенности, в целом пока трудно достижимый.

К нормированию освещения можно подойти и с экономической точки зрения.

Улучшение освещения не только имеет большое гигиеническое и физиологическое значение, не только ведет к снижению производственного травматизма, но в большинстве случаев вызывает и увеличение производительности труда. Нельзя недооценивать это обстоятельство. Речь идет не о том, что при переходе от оценки «темно, работать трудно» к достаточному освещению естественно увеличивается скорость работы. Сотни, если не тысячи исследований, выполненных и в нашей стране, и за рубежом, показали, что переход от, казалось бы, достаточного освещения к еще более лучшему, например от сотен люксов к тысячам, вызывает весомое увеличение производительности труда, чаще всего в пределах от 5 до 20%.

13253

При увеличении производительности предприятия из-за улучшения условий освещения приходящаяся на единицу продукции стоимость сырья и энергии, расходуемой на технологические нужды, а также прямая зарплата (при сдельной оплате труда) остаются неизменными. Расходы на освещение, отнесенные к затратам на единицу продукции, возрастают, так как производительность труда растет медленнее, чем затраты на освещение. Но так как расходы на амортизацию здания, на его отопление и вентиляцию, на оплату административного персонала и т. д. остаются неизменными, то их доля в себестоимости изделия уменьшается и эта доля при некоторой освещенности достигает минимума, хотя и не резко выраженного. В аналогичной зависимости от освещенности находится и получаемая предприятием масса прибыли, хотя условия, при которых достигается минимум себестоимости и максимум прибыли, не вполне совпадают.

Таким образом, можно говорить об экономически наивыгоднейшей освещенности, или, более широко, о наивыгоднейших условиях освещения. Эта освещенность зависит от многих обстоятельств, из которых особо надо выделить степень зависимости производительности труда от освещения, в свою очередь определяемую долей не полностью механизированных операций и степенью участия в них зрительного анализатора.

Предложения основывать нормирование освещения на теории наивыгоднейших осветительных условий не получили в нашей стране признания по многим причинам.

Во многих случаях превалирующее значение имеют факторы, лежащие вне сферы экономики: безопасность труда, культура производства, гигиена зрения и т. д. При широко осуществляемой механизации и автоматизации производства во все большем числе случаев производительность труда становится мало зависящей от освещения, хотя его роль не уменьшается. Условия оптимальной освещенности с точки зрения экономики подвержены изменению и во времени, так как они должны корректироваться при каждом изменении учитываемых ими факторов, и в пространстве, так как они зависят от тарифных ставок, транспортных расходов, тарифа на энергию и т. д., а все эти показатели различны для различных районов страны.

Тем не менее следует помнить, что в определенных пределах улучшение условий освещения вполне оправдано экономически, и поддержать мысль, высказываемую некоторыми авторами, что дорого стоит плохое, а не хорошее освещение. В литературе капиталистических стран, где прибыль ставится во главу угла, можно найти сведения о том, например, что при увеличении освещенности с 350 до 1000 лк дополнительные затраты на освещение с лихвой окупились, или (что, правда, не относится к производительности труда) рекомендацию повышать освещенность частных

РЕЧИЦКИЙ
МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД
г. Речица Гомельской об-

стадионов, чтобы увеличить прибыль, отбив посетителей у конкурентов.

В результате в данное время можно говорить только о нормах, которые, не будучи ни оптимальными, ни экономически наивыгоднейшими, лежат где-то между значениями минимума и оптимума. Уровень этих норм должен, очевидно, определяться технико-экономическими возможностями и повышаться по мере роста последних, что и происходит во всех странах, включая СССР. Таким образом, следует рассматривать существующие нормы освещенности как компромисс между желаемым и возможным.

Значительная часть исследований в области нормирования освещения посвящена обоснованию этих «промежуточных» норм, и именно здесь неизбежно принятие волевых решений, о которых было сказано ранее. Критерием для установления нормы могут быть определенные уровни видимости, относительной видимости, утомляемости, достоверности различения и т. д. Поскольку этот уровень выбран, относительно несложно построить всю шкалу освещенности, но самый выбор исходного уровня едва ли поддается строгому обоснованию.

В основу английского светотехнического кодекса 1961 г. были положены исследования зрительной работоспособности, выполненные Вестоном. Под зрительной работоспособностью здесь понимается произведение скорости различения на вероятность правильного опознавания. Для каждого тест-объекта эта величина зависит от условий освещения и при определенной освещенности достигает максимума. Отношение зрительной работоспособности в данных условиях к максимальной — относительная зрительная работоспособность — характеризует степень соответствия условий освещения оптимальным. Значение этого отношения было принято Вестоном равным 0,9.

Для этого случая и для среднего контраста, равного 0,25, эмпирически получено выражение для нормы освещенности:

$$E = \frac{1930}{\rho\alpha^{1,5}},$$

где ρ — коэффициент отражения фона; α — угловой размер различаемых деталей, ...′. Расчет по этой формуле дает значения освещенности в пределах от 76 лк при $\rho = 0,8$ и $\alpha = 10'$ до 19 300 лк при $\rho = 0,1$ и $\alpha = 1'$.

В США основная работа по нормированию освещения была выполнена Блекуэллом. При опытах производилось различение деталей определенного размера, причем требовалось, чтобы за 0,2 с эти детали различались с вероятностью 0,99.

При переходе от выводов лабораторных исследований к практическим рекомендациям введен так называемый коэффициент сверхпорогового контраста, учитывающий, что в реальных условиях многие обстоятельства становятся недействительными, так как в лаборатории испытывались наблюдатели с нормальным зрением, знавшие, когда где и какая деталь должна появиться.

Действующие в СССР нормы [1] определены исходя из обеспечения заданного значения относительной видимости (0,7), причем это значение, хотя и представляется разумным, строгого обоснования не имеет.

Каковы бы ни были показатели, положенные в основу норм освещенности, одинаковый уровень этих показателей для различных работ достигается при различных уровнях освещенности

и всякое нормирование должно дифференцированно учитывать характеристики зрительного процесса.

Такими характеристиками являются:

1) точность работы, т. е. либо наименьший угловой размер различаемых деталей, либо их линейный размер в сочетании с расстоянием, с которого они рассматриваются;

2) коэффициент отражения фона, на котором различаются детали, определяющий при данной освещенности его яркость;

3) контраст между деталями и фоном;

4) необходимость поиска деталей (в случае неопределенности места их появления) и наличие посторонних, отвлекающих деталей;

5) подвижность рабочей поверхности, затрудняющая различение деталей;

6) относительная длительность зрительного напряжения в продолжение рабочего времени. Этот фактор имеет очень большое значение. Периодически определять время по часам можно и при лунном свете, но непрерывный контроль того или иного процесса требует большого напряжения зрения. Чертежник, хотя и занят точной зрительной работой бо́льшую часть рабочего времени, имеет возможность произвольных перерывов в работе для отдыха глаза, рабочий же, осматривающий изделия, непрерывно движущиеся по конвейеру, такой возможности лишен.

Не являются характеристиками зрительного процесса, но имеют значение и учитываются (или могут учитываться) при нормировании освещения также следующие факторы:

1) опасность прикосновения к предметам, находящимся в рабочей зоне: режущему инструменту, токоведущим частям и т. п.;

2) наличие в поле зрения самосветящихся поверхностей, резко контрастирующих с фоном; контраст, в данном случае вредный, может быть уменьшен, если яркость и детали и фона увеличить в одно и то же число раз, т. е. сильно осветить рабочее место;

3) повышенные санитарно-гигиенические требования к работе;

4) отсутствие или недостаточность естественного освещения, что может быть отчасти компенсировано увеличением освещенности искусственного освещения;

5) возраст работающих; с одной стороны, зрение детей и подростков желательно поставить в наиболее благоприятные условия, с другой стороны, как показали некоторые исследования, с возрастом увеличивается потребность в освещении, уже к 30 годам повышаясь в 1,5 раза.

Возможны и осуществляются две системы построения норм: составление значений освещенностей для конкретно поименованных рабочих мест и помещений или составление таблицы, в которой освещенность дается в функции признаков, характеризующих зрительный процесс, без указания конкретных рабочих мест.

Первая система позволяет наиболее полно учесть все индивидуальные особенности каждого производственного процесса, но

так как число отраслей промышленности и различных рабочих мест в каждой из этих отраслей чрезвычайно велико, она требует исключительно большого объема исследований, которые, даже продолжаясь непрерывно, едва ли смогут успевать за развитием производства.

Вторая система позволяет составить нормы в виде относительно компактных таблиц, универсальных в том отношении, что по ним можно выбрать норму освещенности и для таких производств, которых вообще не существовало еще в момент утверждения норм. Вместе с тем в таких нормах практически невозможно учесть все индивидуальные характеристики каждой отдельной работы. В мировой практике в той или иной степени имеют применение обе системы.

При второй системе нормирования имеет значение вопрос о полноте учитываемых характеристик и о степени их количественной дифференциации. Чем больше характеристик учтено, чем на большее число интервалов разбиты их количественные признаки, тем, казалось бы, «точнее» могут быть нормы. Но из ранее сказанного ясно, что требовать от норм точности вообще нет оснований, с другой же стороны, усложнение норм многими характеристиками, да еще разбитыми на мелкие интервалы, не только увеличивает объем норм, но и затрудняет пользование ими.

Поясним это: легко определить на глаз, лежит ли возраст малознакомого человека в пределах от 20 до 30, от 30 до 40 лет и т. д., но очень трудно оценить его возраст с точностью до одного года. Подобно этому, даже будучи знакомым с той или иной работой, нелегко определить, различение деталей какого размера и при каком контрасте с фоном является основной зрительной задачей, в то же время легко оценить эту работу, как требующую, в целом, большого, среднего или малого зрительного напряжения. Примером норм, в основу которых положено разделение работ на ограниченное количество групп со словесной характеристикой трудности зрительной задачи, являются нормы ФРГ ДИН 5035.

Нормы освещенности, действующие в СССР, более подробно рассматриваемые в § 2-1, построены по второй системе, т. е. в функции обобщенных характеристик зрительной задачи с их достаточно дифференцированным учетом. Непосредственный выбор освещенности по этим нормам представляет определенные трудности, и поэтому на основании общих норм составляются и утверждаются нормы освещенности для отдельных отраслей промышленности, содержащие уже расписание освещенностей для конкретно поименованных помещений и рабочих мест. При составлении отраслевых норм в отдельных случаях допускаются обоснованные отступления от общих норм. Таким образом, в СССР осуществляется, можно сказать, комбинированная система нормирования.

Остановимся вкратце на принципах нормирования качественных характеристик освещения, впервые введенного у нас в 1971 г. [1]. (О сущности нормируемых качественных характеристик указано в § 1-5.)

Для показателя ослепленности, показателя дискомфорта и коэффициента пульсации нормами устанавливаются наибольшие допустимые значения.

Всякое значение первого из этих показателей, большее единицы, уже свидетельствует об ухудшении условий работы зрения. Почти так же обстоит дело с показателем дискомфорта, хотя здесь ощущение неприятности начинается,

по-видимому, со значений примерно 15—20. Коэффициент пульсации отрицательно проявляет себя начиная от значений примерно 5—10%.

Между значениями этих трех показателей и материально-энергетическими затратами не существует такой однозначной связи, как между теми же затратами и освещенностью, но все же снижение их до заведомо безвредных значений связано с определенными трудностями, имеющими ценностное выражение. В результате здесь, как и при нормировании освещенности, приходится искать компромисс между желаемым и возможным и для каждого случая устанавливать такое предельное значение показателя, которое можно считать приемлемым для данных условий. При этом, естественно, работы, требующие большего зрительного напряжения, должны быть обеспечены лучшими условиями.

Пульсации освещенности вредны, помимо прочего, тем, что могут быть причиной так называемого «стробоскопического эффекта», т. е. неправильного восприятия движущихся или вращающихся предметов. При этом поступательно движущиеся предметы приобретают многократные контуры, вращающиеся — могут показаться остановившимися или изменившими направление вращения. Возможность возникновения стробоскопического эффекта учитывается при нормировании коэффициента пульсации.

Относительно просто обстоит дело с нормированием цилиндрической освещенности. Методом экспертных оценок нетрудно установить, при каких ее значениях степень насыщенности пространства светом субъективно оценивается как большая, повышенная или нормальная, и регламентировать эти значения. Нормирование цилиндрической освещенности осуществляется для таких помещений, в которых одной из зрительных задач, или основной задачей, является обзор окружающего пространства.

1-4. ЦВЕТ В ТЕХНИКЕ ОСВЕЩЕНИЯ

В теории светотехники понятие «цвет» рассматривается в двух аспектах: с точки зрения количества — яркость и качества — цветность, причем последняя также имеет вполне определенную числовую оценку. В практике, однако, часто пользуются словом «цвет», имея в виду цветность; в дальнейшем изложении эти понятия также четко не разделяются *.

Полной характеристикой излучения источников света в отношении цветности является кривая распределения энергии в их спектре, дающая для различных значений длины волны λ значения излучаемой мощности φ_λ. Примеры таких кривых показаны на рис. 1-6. Аналогичной характеристикой отражающих или пропускающих свет поверхностей являются кривые, изображающие зависимость от длины волны коэффициента отражения ρ_λ или коэффициента пропускания τ_λ.

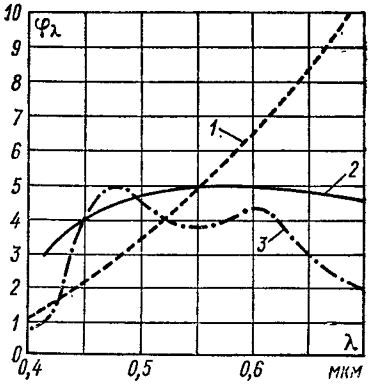

Рис. 1-6. Кривые распределения энергии в спектре

1 — лампы накаливания; *2* — рассеянный дневной свет; *3* — люминесцентные лампы (в среднем)

* В данной книге приводится лишь краткое рассмотрение вопросов цвета применительно к технике освещения. Более подробно они рассмотрены в [2 и 3].

Характеристикой излучения, отраженного или пропущенного данной поверхностью при освещении ее определенным источником, служит кривая, ординаты которой для каждого значения λ получены путем умножения φ_λ на ρ_λ или τ_λ. Уже отсюда видно, что цветность поверхностей определяется свойствами не только их самих, но и освещающих их источников.

Если характеристика φ_λ или соответствующие характеристики ρ_λ, τ_λ являются прямыми, параллельными оси λ, то излучение или поверхности признаются «белыми». Однако, кроме такого «равноэнергетического» белого, признается белым и излучение некоторых стандартных источников, кривая распределения которых имеет иную форму. Серый цвет рассматривается как белый цвет уменьшенной яркости.

Будучи важными и, в частности, необходимыми для расчетов цветности, кривые спектрального распределения не дают, однако, наглядного представления о результативной цветности. Более того, одна и та же цветность может быть получена при неограниченном множестве различных кривых распределения (обратное положение не имеет места). По этим причинам количественная оценка цветности основана на иных принципах.

«Полный излучатель», т. е. абсолютно черное тело, при повышении температуры нагрева изменяет характер излучения, которое из красного становится желтым, белым и наконец синеватым, но никогда не бывает, например, зеленым или коричневым. Поэтому многие, но не все, цветности могут быть охарактеризованы цветовой температурой $T_ц$, т. е. той температурой, при которой излучение черного тела имеет цветность, совпадающую с данной. Цветовая температура $T_ц$ может не иметь ничего общего с физической температурой излучателя. Так, приписывая определенной люминесцентной лампе температуру $T_ц = 4850$ К, а синему небосводу — $T_ц = 11\ 000$ К, мы знаем, что эти излучатели подобной температуры не имеют. Вместе с тем при достаточном опыте значения $T_ц$ наглядно характеризуют излучатели.

Известно, что смешением трех основных цветов: красного, зеленого и синего могут быть получены почти все существующие цвета. Чтобы получить все цвета без исключений, удобно вообразить (и представить в графической и аналитической форме), что происходит смешение трех условных, не существующих в природе цветов X, Y, Z, более насыщенных, чем соответственно красный, зеленый и синий. Тогда, если доля каждого из этих цветов в смеси равна соответственно x, y, z, то любой цвет может быть выражен уравнением

$$\Phi = xX + yY + zZ.$$

Размерности величин выбираются так, чтобы сумма $x + y + z$ была равна единице, и тогда для характеристики цветности достаточно знать лишь две координаты цветности: x и y, которые и указываются в стандартах на излучатели, альбомах цветов и т. д.

Графическим изображением поля цветов и законов их смешения является цветовой треугольник (рис. 1-7).

Замкнутая линия, проведенная на графике, ограничивает все множество существующих цветов, причем точки, лежащие на ее криволинейной части между R и B, соответствуют чистым спектральным цветам, характеризующимся определенной длиной волны, а точки нижней прямой — пурпурным цветам, образу-

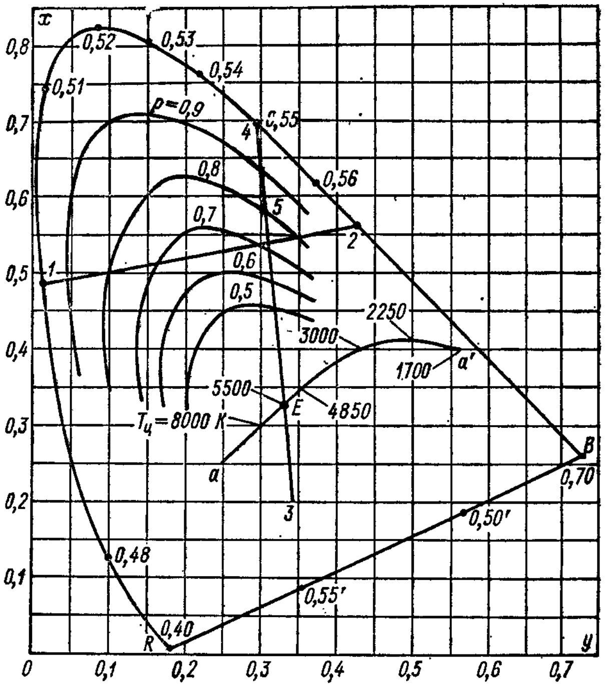

Рис. 1-7. Цветовой треугольник

ющимся при смешении синего и красного цветов. Пурпурные цвета отсутствуют в спектре, но нередко встречаются в жизни. Тогда E в центре соответствует равноэнергетическому белому цвету.

График и отображаемые им явления характеризуются следующими свойствами:

1) цвет, образующийся в результате смешения двух цветов, например *1* и *2*, изображается точкой на линии, соединяющей смешиваемые цвета, положение которой определяется соотношением цветов в смеси;

2) один и тот же цвет может быть получен неограниченным числом способов, так как через данную точку можно провести множество хорд;

3) хотя один и тот же цвет, будучи полученным разными способами, одинаково воспринимается зрением, но, имея разный спектральный состав, он может, в зависимости от последнего, создать разную цветность освещаемых поверхностей;

4) цвета, лежащие на противоположных концах хорды, проведенной через точку *E*, создают при смешении в определенной пропорции белый цвет и называются дополнительными;

5) цвет смеси двух цветов, не лежащих на прямолинейной части графика, изображается точкой, приближенной к точке *E*, т. е. уменьшает свою чистоту, как бы разбавляясь белым.

С последним обстоятельством связан третий, удобный и распространенный способ оценки цветности. Проведем прямую *3—4* через точки *E* и данного цвета. Точка *5* на этой прямой может рассматриваться как цвет, полученный в результате смешения цвета *4* с белым цветом. Длина волны, соответствующая цвету *4*, будет определять цветовой тон точки *5*, а степень удаленности точки *5* от *E* — чистоту цвета *p*.

Пурпурные цвета, а также цвета точек, лежащих между линией пурпурных цветов и точкой *E*, условно характеризуются длиной волны λ', соответствующей λ для точки на конце линии, проведенной через данную точку и точку *E*.

На графике линией *а — а'* показана также совокупность точек, через которые проходит цвет полного излучателя при повышении его температуры, т. е. те цветности, которые точно могут быть характеризованы значением $T_ц$.

Цветности, изображаемые весьма близкими точками на графике, визуально не отличимы друг от друга. Минимально различимая разница в цветности называется цветовым порогом. Цветовой треугольник можно перестроить таким образом, чтобы расстояние между точками двух цветов непосредственно в масштабе давало число цветовых порогов; в этом случае шкалы *x* и *y* получаются неравномерными.

Определение цветовых координат или также цветового тона и чистоты цвета производится на основе кривых спектрального распределения и стандартных характеристик среднего глаза и здесь не рассматривается.

В лабораторных условиях для измерения цветности применяются специальные приборы, в практике же часто применяются различные альбомы цветов, в которых приведены выкраски с известными цветовыми характеристиками, сопоставляемые с исследуемыми образцами.

Психологическое и отчасти физиологическое воздействие на человека цветности излучения источников света, а также цветности окружающих поверхностей, несомненно в значительной степени связано с теми световыми условиями, к которым человечество приспособилось за время своего существования. Далекое и холодное голубое небо, создающее в течение большей части светового дня высокие освещенности, вечером — близкий и горячий желто-красный костер (а затем пришедшие ему на смену, но родственные ему «лампы сгорания»), создающий, однако, низкие освещенности, — таковы световые режимы, приспособлением к которым, вероятно, объясняются следующие факты. Более работоспособное состояние человека днем, при свете относительно холодных оттенков и преимущественный отдых вечером, при теплом, красноватом свете, вероятно, привели к тому, что и в современных, несколько изменившихся условиях холодные оттенки искусственного

света признаются преимущественно благоприятствующими работе, а теплые — отдыху. Возможно, это одна из причин того, что люминесцентные лампы до сих пор не нашли массового применения в квартирах.

Независимо даже от уровня работоспособности при увеличении освещенности наступает момент, когда человек признает освещение комфортным, при очень же высоких освещенностях наблюдается верхняя граница зрительного комфорта. Положение этих границ оказалось сильно зависящим от цветовой температуры излучения (рис. 1-8), что опять-таки можно объяснить привычкой человека к высоким освещенностям при дневном освещении и низким — при искусственном. В какой-то степени спектрально воспроизводя дневное освещение при люминесцентных лампах, мы, оказывается, должны приблизиться к последнему и в отношении уровней освещенности, слабое же люминесцентное освещение психологически воспринимается как дневное освещение в сумерки или перед грозой. Этот «сумеречный эффект» является одной из причин повышения норм освещенности при газоразрядных источниках света. В частности, при лампах типа ЛД последние следы сумеречности исчезают при освещенности только примерно 400—500 лк, а при освещенностях менее 100—150 лк люминесцентное освещение иногда признавалось менее благоприятным для работы, чем освещение лампами накаливания при такой же освещенности.

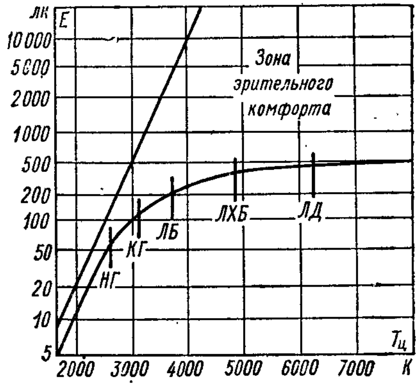

Рис. 1-8. Границы светового комфорта (у засечек указаны типы ламп: *НГ* — накаливания газонаполненная; *КГ* — кварцевая галогенная; *ЛБ* — люминесцентная белого света; *ЛХБ* — люминесцентная холодно-белого света; *ЛД* — дневного света

Любопытно подсчитать, что залы дворцов, в которых проходили балы в XVIII—XIX столетиях и которые обычно описываются как залитые светом тысяч свечей, в действительности не могли иметь больше мизерной по современным понятиям освещенности 10—30 лк.

Достаточно известно, что поверхности голубых тонов, а также очень темные поверхности воспринимаются как «отступающие», т. е. представляются расположенными дальше, чем в действительности (что иногда ведет к кажущемуся увеличению размеров помещения), красные же тона представляются «выступающими». Некоторые тона, как, например, сине-фиолетовые, производят раздражающее впечатление и способствуют утомлению человека, другие, в частности зеленые, дают противоположный результат. Есть мнение, по-видимому, достаточно обоснованное, что субъективное восприятие человеком таких факторов внешней среды, как температура, шум и даже запахи, в определенной степени зависит от цветности поверхностей, находящихся в поле зрения.

Частным случаем роли спектрального состава излучения источников света в оформлении интерьера помещений является зависимость от него цветности стен и других поверхностей помещения. Принято считать, что цветовой тон

отделки интерьера должен соответствовать цветовому тону излучения ламп, но это правило не является исчерпывающим и в ответственных случаях следует производить пробные выкраски поверхностей при свете тех источников, которые намечается установить в данном помещении.

От источников света чаще всего требуется, чтобы цвета освещаемых ими поверхностей выглядели «правильно», т. е. так же, как при условиях освещения, которые можно считать нормальными. Такими условиями обычно считается естественное дневное освещение.

Известно, что темно-синяя ткань при свете ламп накаливания кажется черной, желтый цветок грязно-белым и т. д. Есть, однако, предметы, которые люди привыкли видеть преимущественно вечерами, при искусственном освещении, и, например, золотые украшения «естественнее» выглядят при свете ламп накаливания, чем при свете люминесцентных ламп.

В тех отраслях промышленности, где производится выбор или проверка цветности поверхностей, в частности во многих цехах текстильной, швейной, меховой, полиграфической промышленности, вопросы цветопередачи имеют большое значение. Не меньшее значение они имеют при освещении музеев и выставок, многих магазинов и т. д. Качество передач цветного телевидения также в сильной степени зависит от цветности освещения.

При преобладании в освещаемых поверхностях определенного цветового тона наиболее важна цветопередача в данной области спектра, в общем случае — по всему спектру.

Для оценки источников света по их цветопередаче получил определенное применение индекс цветопередачи, который упрощенно можно определить как среднюю для многих участков спектра степень соответствия результативной цветности образца эталонным условиям. Из числа массово применяемых источников света наибольший индекс, около 96, имеют ксеноновые лампы, наименьший — 25 — натриевые лампы высокого давления.

Встречаются случаи, когда в противоположность вышесказанному оправдано сколь угодно низкое качество цветопередачи, но требуется повышение цветовых или яркостных контрастов между деталями и фоном.

Пусть цветовой тон деталей $\lambda_д$, а фона $\lambda_ф$, причем эти значения мало различаются между собой (мал цветовой контраст), а коэффициенты отражения деталей и фона, соответственно $\rho_д$ и $\rho_ф$, также близки друг к другу.

Тогда если $\rho_д < \rho_ф$, то контраст будет усилен, когда в падающем свете имеет место возможно меньшее излучение в области $\lambda_д$, если же $\rho_д > \rho_ф$, то следует иметь минимальное излучение в области $\lambda_ф$. В подобных случаях не исключается снабжение источников света цветными светофильтрами. Как пример укажем, что желтые цветоделенные отпечатки на белой бумаге (при многоцветной печати в полиграфии) контрастно выделяются при синем свете.

1-5. КАЧЕСТВО ОСВЕЩЕНИЯ

Под качеством осветительной установки в широком смысле понимается совокупность всех ее признаков, включая, конечно, и уровень освещенности. Обычно, однако, термину «качество освещения» придается более узкий смысл, а именно: под ним понимается вся совокупность характеристик осветительной установки, определяющая условия зрительной работы, кроме уровня освещенности.

Характеристики качества освещения имеют не меньшее, а нередко большее значение, чем уровень освещенности, и случается, что при достаточной освещенности осветительная установка оказывается неэффективной или вовсе непригодной именно из-за ее низкого качества в узком смысле слова. В принципе все характеристики качества освещения могут иметь численную оценку, которая в некоторых случаях регламентируется нормами.

Ниже приводится перечень качественных характеристик освещения и указываются способы их улучшения. Отмечается, что часть этих характеристик является взаимосвязанной и нередко одна и та же особенность осветительной установки оказывает влияние на несколько характеристик. В данном параграфе вопрос рассматривается, в основном, применительно к внутреннему освещению; специфике освещения открытых пространств посвящен § 7-5.

Прямая блескость. Находящиеся в поле зрения человека поверхности высокой яркости, в частности источники света и осветительные приборы, могут производить неприятное, дискомфортное ощущение или даже вызывать состояние ослепленности, характеризуемое уменьшением работоспособности. Свойство больших яркостей производить слепящее действие называется блескостью.

В зарубежной литературе иногда различают психологическую блескость, вызывающую только ощущение дискомфорта, и физиологическую блескость, характеризуемую снижением зрительных функций.

Начиная с первых же редакций отечественных светотехнических норм, в них обращалось серьезное внимание на задачу ограничения блескости, для чего регламентировались наименьшие высоты установки светильников в зависимости от тех или иных их характеристик. С 1971 г. в нормы [1] введены количественные требования к ограничению слепящего действия высоких яркостей путем регламентации показателя ослепленности *P* — для производственных зданий и показателя дискомфорта *M* — для общественных зданий.

Показатель *P* характеризует степень снижения контрастной чувствительности, т. е. соответственно видимости, вызванной наличием в поле зрения высокой яркости, показатель *M* — снижение субъективно оцениваемой степени зрительного неудобства.

Подчеркивается, что речь идет не о двух разных явления, а о разных степенях или формах одного явления. Зона ослепленности, при которой наблюдается

снижение контрастной чувствительности, также может быть охарактеризована соответственно повышенными значениями M, и в принципе для оценки вредного воздействия блескости могла бы быть принята единая характеристика.

Механизм изменения контрастной чувствительности можно представить себе как появление в поле зрения так называемой вуалирующей пелены, снижающей эффективный контраст между деталями и фоном (см. ниже расчет для случая отраженной блескости). Если яркость поля адаптации L_a и яркость вуалирующей пелены β, то показатель ослепленности

$$P = \frac{\beta}{L_a} 10^3.$$

Множитель 10^3 введен для удобства расчетов, так как в практических случаях речь идет о снижении контрастной чувствительности не более чем на 8%.

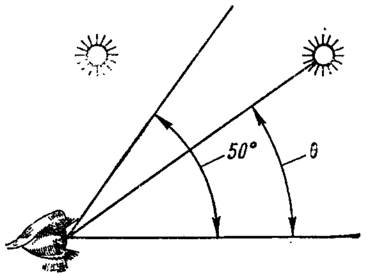

Рис. 1-9. Угол, определяющий положение в поле зрения слепящей яркости

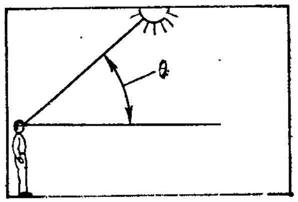

Рис. 1-10. «Естественный» защитный угол

Что касается яркости вуалирующей пелены, то она определяется освещенностью $E_з$ плоскости зрачка и углом θ между осью зрения и направлением на блеский источник (рис. 1-9):

$$\beta = m\frac{E_з}{\theta^2},$$

где m — коэффициент, зависящий от уровня слепящей яркости.

Из формулы видно, какую важную роль играет угол θ, с увеличением которого ослепленность резко уменьшается, а при $\theta \geqslant 50°$ — практически прекращается, так как слепящая яркость уже не попадает в поле зрения. Для светильников, имеющих защитный угол γ (§ 2-6, рис. 2-11), наименьший угол θ, под которым лампа может попасть в поле зрения, равен этому защитному углу. В помещениях небольшой площади и достаточной высоты наименьшее значение θ определяется сочетанием размеров помещения, которое создает так называемый естественный защитный угол (рис. 1-10).

Исследованию вопросов ослепленности и дискомфорта посвящено громадное число работ, но вопросы эти столь сложны, что их изучение отнюдь нельзя считать законченным.

Нормирование показателей, характеризующих слепящее действие источников света, не менее, а скорее более сложная задача, чем рассмотренная в § 1-3 задача нормирования освещенности, и так же как последняя, неизбежно требующая волевых решений.

При кажущейся простоте исходных формул расчет этих показателей оказывается очень сложной задачей, которая не может быть рассмотрена в рамках данного руководства.

Дело в том, что слепящее действие одиночного блеского источника при детальном рассмотрении определяется большим количеством факторов, в числе которых:

характеристики блеского источника: яркость, сила света, видимая поверхность в различных направлениях пространства;

направление осей зрения работающих, которое приходится оценивать условно, учитывая неизбежную подвижность этих осей;

расположение источника в поле зрения, причем, помимо упомянутого угла θ, имеет значение, хотя и меньшее, азимутальный угол, т. е. смещение источника в боковом направлении;

уровень и характер распределения яркости во всем поле зрения, что определяется значением освещенности и отражающими свойствами всех поверхностей.

При обычном наличии в поле зрения многих блеских источников степень слепящего действия должна определяться отдельно для каждого из них, общий же результат должен определяться на основе законов суммирования, не вполне еще изученных.

Все сказанное почти в равной степени относится как к ослепленности, так и к дискомфорту.

При практической невозможности индивидуально рассчитывать степень слепящего действия приходится идти различными путями, как, например:

регламентировать, как уже сказано выше, наименьшую высоту установки светильников, дифференцируя ее по тем или иным признакам;

регламентировать, также дифференцированно, габаритную (среднюю по поверхности) яркость блеских источников по отдельным зонам;

пренебрегая теми или иными второстепенными факторами и допуская разумные усреднения, составлять более или менее обширные таблицы, ограничивающие область применения светильников этого типа при данной высоте установки и коэффициентах отражения поверхностей определенными отношениями $L : h$ (см. § 2-5).

Уменьшение слепящего действия может быть достигнуто:

увеличением высоты установки светильников;

уменьшением яркости светильников путем закрытия источников света светорассеивающими стеклами;

ограничением силы света в направлениях, образующих значительные углы с вертикалью, путем применения светильников с достаточным защитным углом;

уменьшением мощности каждого отдельного светильника за счет соответствующего увеличения их числа, что, однако, связано с удорожанием установки и усложнением ее обслуживания;

увеличением коэффициентов отражения всех поверхностей, находящихся в поле зрения.

Отраженная блескость. Отраженная блескость является крупнейшим недостатком многих осветительных установок, и принятие мер для ее устранения должно рассматриваться как одна из важнейших задач.

Даже диффузные поверхности при очень больших освещенностях и достаточно высоком коэффициенте отражения могут производить слепящее действие, если размеры таких поверхностей велики. Встречаются случаи, когда для части поверхностей, находящихся в поле зрения, но не являющихся основными рабочими поверхностями, специально выбираются материалы с уменьшенным коэффициентом отражения. Наибольшая опасность возникает при освещении поверхностей, не являющихся диффузными.

В этих случаях, если свет падает на рабочие поверхности таким образом, что глаза работающих находятся на направлении зеркального отражения лучей, то работающие видят либо зеркальное отражение источника света, либо размытое, но очень яркое световое пятно. В обоих случаях может возникнуть состояние ослепленности, чаще же всего уменьшается эффективный контраст между деталями и фоном.

Рассмотрим случай освещения поверхности, например картины в остекленной раме, большой светящей поверхностью при следующих конкретных данных: картина имеет диффузную поверхность со средним значением коэффициентов отражения фона 0,4 и деталей 0,2, т. е. характеризуется контрастом (0,4—0,2) : 0,4 = 0,5. Коэффициент зеркального отражения остекления 0,08, яркость светящей поверхности 300 кд/м², освещенность картины 100 лк.

Действительная яркость деталей $\frac{100 \cdot 0{,}2}{3{,}14} \approx 6{,}4$ кд/м² и фона 12,8 кд/м², но если светящая поверхность отражается в остеклении, то на обе эти яркости накладывается дополнительная яркость $300 \cdot 0{,}08 = 24$ кд/м². Сама по себе эта яркость заведомо не является слепящей, но с ее учетом видимая глазу яркость деталей составит около 30 кд/м² и фона 37 кд/м², в результате чего контраст окажется равным $(37 - 30) : 37 = 0{,}19$, т. е. снизится в $0{,}5 : 0{,}19 = 2{,}6$ раза.

Задача устранения отраженной блескости относительно легко решается при местном и локализованном освещении. В большинстве случаев для этого достаточно выбрать такое расположение светильников, чтобы зеркально отраженные поверхностью лучи не попадали в глаза работающего, т. е. чаще всего осуществить боковое или заднебоковое направление света.

В более редких случаях, когда фон обладает блеском, а детали, будучи темнее фона, не блестят (риски и другие дефекты на металле или пластмассе), может оказаться целесообразным, наоборот, направить зеркально отраженные лучи в глаза работающего, если светящая поверхность имеет большие размеры и малую яркость. Имеется рекомендация применения в таких слу-

чаях светильников с люминесцентными лампами, перекрытых рассеивающим стеклом, однако в светильниках с трубчатыми лампами такое стекло лишь незначительно снижает яркость. Более желательно применение специальных осветителей уменьшенной яркости и увеличенной площади. Применение белого

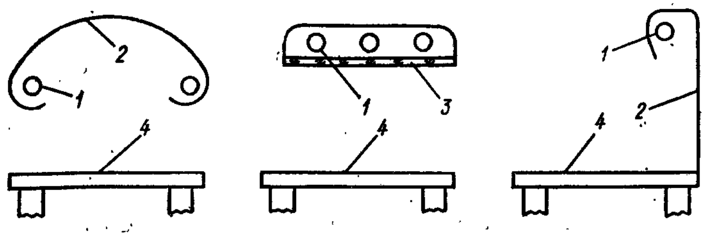

Рис. 1-11. Светящие поверхности увеличенных размеров

1 — лампа; 2 — диффузная отражающая поверхность; 3 — диффузное стекло; 4 — освещаемая поверхность

экрана, светящего отраженным светом, или светильников увеличенных размеров получили некоторое применение (рис. 1-11).

Одной из часто встречающихся задач является ограничение отраженной блескости при освещении вертикальных поверхностей, например электрических щитов или музейных экспозиций. Наблюдения показали, что при рассмотрении этих поверхностей человек выбирает такую позицию, чтобы направление взгляда на верхние точки образовывало с горизонталью угол не более 45° (рис. 1-12). Соответственно осветительные приборы должны быть расположены так, чтобы свет на верхние точки рассматриваемых поверхностей падал под углом не менее 45° с нормалью к поверхности.

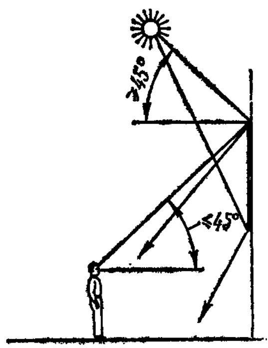

Рис. 1-12. Отраженная блескость при освещении вертикальных поверхностей

При общем освещении отраженная блескость снижается, если стены и потолки имеют достаточную яркость, и сильно уменьшается при отраженном освещении или при освещении светящими потолками. Однако в этом случае отражение светящих поверхностей в освещаемых может привести к образованию «световой дымки», снижающей эффективный контраст между деталями и фоном (см. пример выше).

Некоторые частные задачи ограничения отраженной блескости рассмотрены в гл. 7.

Контраст между деталями и фоном. Уже из ранее сказанного ясно, что контраст между деталями и фоном, в наибольшей степени определяющий условия видимости деталей, не всегда является заданным и может быть увеличен или уменьшен средствами освещения.

Если детали рельефны (шероховатости на поверхности, риски на металле, наколы циркуля на ватмане и т. п.), то контраст между ними и фоном может быть увеличен путем создания при определенном направлении света микротеней. Если детали и фон обладают различными пространственными яркостными характеристиками, т. е. разной степенью блеска в одинаковом направлении, то это также может быть использовано для увеличения контраста. Как пример укажем работу на станках для лощения черной кожи: если свет направлен так, что лучи, зеркально отраженные лощеной частью кожи, не попадают в глаза, то нелощеная часть кажется светлее лощеной, в противном же случае она кажется темнее. Здесь, как видим, контраст может менять не только значение величины, но и ее знак.

Одним из эффективных средств для повышения контраста является искусственный фон (чаще всего — светлый). Так, при намотке катушек реле сделать хорошо видимой проволоку между падающей и принимающей катушками легче всего, поместив за проволокой светлый фон. Такой же фон часто приносит пользу при работах, связанных с различением нитей в текстильном производстве. При лекальных работах просвет между деталью и лекалом хорошо просматривается на светлом фоне; так как яркость светильника или лампы велика, для этой цели целесообразно пристроить к светильнику местного освещения специальный экран.

Разновидностью искусственных фонов являются световые столы, на которых поверхности просматриваются в проходящем свете и которые используются при копировке с темных оригиналов, а также при ретушевальных и монтажных работах в фото- и кинотехнике.

Само собой разумеется, что при определенных условиях могут использоваться не только светлые, но и темные искусственные фоны. Если детали и фон отличаются по цветности, то для увеличения контраста могут использоваться приемы, указанные в § 1-4.

Тени. В технике освещения различаются собственные тени, образованные рельефом поверхности, и тени, падающие от предметов, находящихся вне поверхности: конструкции оборудования, корпус и руки работающего и т. д.

Собственные тени, как уже отмечалось, могут быть во многих случаях полезными. Падающие тени (считая даже, что в затененных местах обеспечена нормированная освещенность) вредны почти всегда, за исключением редких случаев, когда необходимо специально притенить ту или иную поверхность, например, для обнаружения слабых свечений.

Вред падающих теней состоит в том, что они создают в поле зрения ненужный в данном случае контраст, отвлекают внимание, могут привести к тому, что яркость периферийной части поля зрения окажется выше яркости его центральной части и т. д. Поучителен случай, когда на трикотажной фабрике подбор чулок по цвету был крайне затруднен тем, что на часть поверхности чулка падала тень от корпуса работницы, создавая ложный контраст. По вполне понятным причинам особенно вредны движущиеся тени.

Если в освещении данной поверхности участвует несколько светильников, то образуются многократные тени. Глубина таких теней, естественно, меньше, чем однократных, но при большом числе светильников могут образоваться особо неприятные «веерные» тени (рис. 1-13).

Так, при освещении чертежно-копировальных работ очень хорошие результаты дают поперечные по отношению к направлению осей зрения световые полосы, дающие заднебоковое освещение рабочих столов. В этих полосах устанавливаются сплошные ряды люминесцентных ламп; когда же в них размещались часто установленные лампы накаливания, то вместе с чертежным инструментом перемещался целый веер теней, что очень мешало работе.

Опасность возникновения веерных теней — одна из причин того, что при люминесцентном освещении следует избегать размещения светильников в виде рядов с небольшими разрывами и принимать либо сплошные ряды, либо многоламповые светильники, установленные относительно далеко друг от друга.

Неприятное, отвлекающее воздействие производят также разноокрашенные тени, которые появляются если рабочее место с разных сторон освещается спектрально различными источниками света.

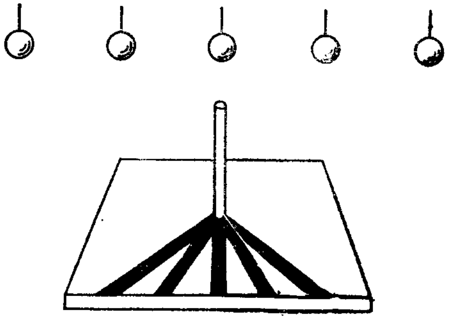

Рис. 1-13. Веерные тени

Устранение или ограничение вредных теней в основном осуществляется правильным выбором направления света. Известно, например, что когда человек пишет или чертит правой рукой, он смотрит на рабочую точку слева и с этой же стороны должен падать свет при направленном освещении.

Тени размазываются при увеличении размеров осветительных приборов, смягчаются при обеспечении достаточно высокой яркости стен и потолков и почти исчезают при отраженном освещении, когда, однако, ухудшается различимость рельефных объектов.

Насыщенность помещения светом. Хотя в практике эффективность осветительных установок чаще всего оценивается по значению освещенности горизонтальной поверхности, давно и хорошо известно, что одна только освещенность какой бы то ни было поверхности не определяет впечатления насыщенности светом, которое получает человек. Были предложены и частично получили применение пространственные характеристики освещения, основанные на учете светового потока во всех направлениях, проходящего через данную точку. Из числа подобных характеристик в нормы СССР [1] с 1971 г. для некоторых помещений общественных зданий вошла цилиндрическая освещенность $E_ц$. Основываясь на предположении, что эффективность излучений пропорциональна косинусу угла между горизонталью и направлением лучей, это понятие определено как отношение светового потока, падающего на боковую поверхность элементарно малого вер-

тикального цилиндра, к площади этой поверхности. Математическое определение $E_ц$ имеет вид:

$$E_ц = \lim_{d,\, l \to 0} \left| \frac{\Phi}{\pi d l} \right|,$$

где d, l — диаметр и высота цилиндра.

Опытами установлено соотношение между значением $E_ц$ и впечатлением насыщенности светом, и при характеристике насыщенности как «большая», «повышенная» и «нормальная» установлены, соответственно, значения освещенности $E_ц$, равные 150, 100 и 75 лк.

Можно согласиться с тем, что определенный уровень освещенности $E_ц$ является необходимым для создания впечатления насыщенности светом, но достаточным он не является. Любое значение $E_ц$ может быть достигнуто, например, с помощью светильников, встроенных в черный потолок при плохо отражающих стенах, или же при освещении помещения только с одной из стен. В обоих случаях никакого впечатления насыщенности светом не будет достигнуто. В более общем виде можно сказать, что никаким одним числом не может быть оценено это впечатление.

Яркость вторичных полей адаптации. При достаточной яркости рабочей поверхности одновременное присутствие в поле зрения темных поверхностей помещений (стен и потолков) создает затруднения адаптации. От яркости этих поверхностей также в значительной степени зависит впечатление насыщенности помещения светом, и ту составляющую $E_ц$, которая создается светом, отраженным от этих поверхностей, можно считать наиболее (если не единственно) ценной.

Когда в помещении установлены подвесные светильники прямого света, верхняя зона помещения остается темной, что производит неприятное эстетическое и даже психологическое впечатление. Кроме того, при достаточной яркости стен и потолков обеспечивается смягчение теней и ослабление блескости. Таким образом, во всех возможных случаях следует требовать светлой окраски или отделки стен и потолков, а для общего освещения применять светильники, излучающие определенную (желательно не менее 15%) часть светового потока в верхнюю полусферу.

К сказанному надо сделать две оговорки. Во-первых, речь, конечно, не идет о высоких, пыльных цехах, где направленный в верхнюю полусферу поток будет бесполезно теряться. Во-вторых, большую роль в данном вопросе играет уровень освещенности и коэффициент отражения пола и других, низко расположенных поверхностей: чем выше значения этих показателей, тем не только больше абсолютное значение яркости потолка, но и тем меньше контраст между потолком и светящими поверхностями светильников.

Постоянство освещенности во времени. С некоторой условностью можно говорить о трех формах зависимости освещенности от времени: медленные и плавные изменения, относительно частые колебания и быстрые пульсации.

Медленные изменения могут быть вызваны постепенным изменением сетевого напряжения, а также теми факторами, которые вызывают общее снижение освещенности в процессе эксплуатации

и учитываются коэффициентом запаса. Поскольку во всех случаях предполагается сохранение освещенности на уровне не ниже нормированного, эти изменения не являются вредными.

Одной из возможных причин колебаний освещенности рабочего места являются случайные перемещения светильников, в связи с чем следует ограничивать возможность раскачивания светильников общего освещения, светильники же местного освещения необходимо укреплять так, чтобы они жестко сохраняли положение, придаваемое им в процессе работы.

Более частой и важной причиной колебаний освещенности являются колебания напряжения в сети, порождаемые изменениями нагрузки. На каждый процент изменения сетевого напряжения источники света отвечают изменением в ту же сторону своего светового потока: лампы накаливания — на 3,7%, люминесцентные лампы — на 1%, лампы типа ДРЛ — на 3%. Идеальной была бы такая степень постоянства напряжения, при которой мгновенные изменения светового потока были бы визуально неразличимы, что соответствует амплитуде колебаний напряжения не более 1—1,5%. Практически приходится допускать и бóльшие по амплитуде колебания напряжения, ограничивая их частоту. Нормативные требования по этому вопросу приведены в § 6-1, здесь же отметим, что по данным наших исследований (1975 г.) при частоте около 1 Гц признавались неприятными колебания с амплитудой в пределах 1,1—4,7% (в среднем 2,9%) без определенной зависимости от типа источника света и уровня освещенности. Разброс данных объясняется не только субъективными особенностями подопытных (испытывалось 15 чел.), но и их психофизиологическим состоянием в момент испытаний.

Крайняя неприятность больших и частых колебаний напряжения общеизвестна, но интересно, что до сих пор попытки получить объективные характеристики их вредности, в частности обнаружить их влияние на производительность труда, не дали результатов. Возможной причиной этого является недостаточная длительность опытов или тот факт, что не исследовались физиологические показатели, на которые эти колебания могут влиять.

Третий вид изменений освещенности — это пульсации, обусловленные малой инерционностью излучения газоразрядных ламп, световой поток которых пульсирует при переменном токе с удвоенной частотой последнего, т. е. в обычных условиях 100 Гц. Эти пульсации неразличимы при фиксировании глазом неподвижной поверхности, но могут быть измерены специальным прибором и легко обнаруживаются при рассматривании движущихся предметов. Так, если в условиях пульсирующего освещения быстро махать карандашом на контрастирующем фоне, то карандаш приобретает ясно видимые многократные контуры. Еще эффектнее пользоваться для этой цели стробоскопическим волчком (рис. 1-14), который можно выполнить из белого картона и на его поверхности нанести радиусы через равные углы. Если при вращении волчка время его перемещения на угол, равный углу между

соседними радиусами, равно периоду пульсаций или в целое число раз меньше его, то волчок покажется остановившимся. При незначительном увеличении скорости волчка он покажется вращающимся в действительном направлении, но очень медленно, при уменьшении скорости — изменившим направление вращения. Все подобные явления известны под названием стробоскопического эффекта. Практическая опасность этого эффекта состоит в том, что вращающиеся части механизмов могут показаться неподвижными и стать причиной травматизма.

Однако пульсации освещенности вредны и при работе с неподвижными поверхностями, вызывая утомление зрения и головную боль. В первые годы применения люминесцентного освещения, когда вред пульсаций недооценивался и для их ограничения не принималось мер, несколько хороших в остальном осветительных установок были скомпрометированы именно из-за пульсаций.

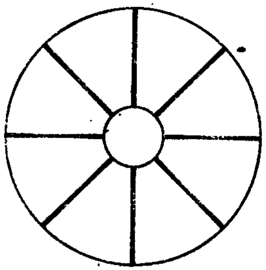

Рис. 1-14. Стробоскопический волчок

Есть основания считать, что к пульсациям особенно чувствительно периферийное зрение и что поэтому они более опасны при общем освещении, чем при местном (при нормировании этот факт не учитывается).

Ограничение пульсаций до безвредных значений достигается равномерным чередованием питания ламп от разных фаз трехфазной сети или равномерным чередованием ламп, питаемых током, отстающим и опережающим по фазе от напряжения; в отдельных случаях применяется питание ламп током повышенной частоты.

Равномерность освещения. Резкое различие яркостей, одновременно находящихся в поле зрения, вызывает неустойчивое состояние адаптационного аппарата; если поверхности различной яркости попадают в поле зрения последовательно, то происходит переадаптация, связанная с временным понижением работоспособности.

Значение этих факторов не следует, однако, переоценивать. Как уже было сказано, при изменении яркости в 5—10 раз переадаптация происходит практически мгновенно. При комбинированном освещении десятикратная разница между освещенностью рабочего места и окружающих поверхностей установлена нормами. Как будет показано дальше, в условиях нормирования наименьшей освещенности поверхностей неравномерность освещения в значительно большей степени ограничивается экономическими, а не гигиеническими соображениями. В случаях когда нормируется средняя освещенность, регламентация неравномерности обязательна, так как иначе при соблюдении заданной средней освещенности нельзя было бы гарантировать никакого определенного значения освещенности отдельных точек.

Помимо перечисленного, к категории качества освещения, безусловно, относятся вопросы спектрального состава света, особо рассмотренные в § 1-4.

В некоторых случаях для повышения качества освещения применяются различные специальные приемы, трудно поддающиеся классифицированию. В числе таких приемов могут быть указаны, например, нанесение на большую поверхность излучателя сетки, по местному искажению отражения которой в бракуемой зеркальной поверхности можно судить о дефектах последней, получение увеличенного изображения мелких деталей на специальном экране и т. д.

Из всего сказанного ясно, сколь сложны и многогранны вопросы качества освещения. Учесть их в полном объеме при проектировании и устройстве освещения не всегда удается, и по возможности следует использовать типовые решения, выработанные ведущими исследовательскими и проектными организациями. При отсутствии таких решений в сложных случаях желательно проверять первоначально намеченные решения путем осуществления опытных установок.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СВЕТОТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

2-1. ВЫБОР ОСВЕЩЕННОСТИ

Первые в СССР обязательные нормы освещенности были разработаны в 1928 г. проф. П. М. Тиходеевым и утверждены Народным комиссариатом Труда. С того времени нормы многократно пересматривались в сторону повышения, причем одновременно расширялся круг регламентируемых ими вопросов. В настоящее время действуют нормы освещенности СНиП II-4-79 [1] *.

Эти нормы охватывают естественное и искусственное освещение промышленных предприятий, работ на открытом воздухе, общественных и жилых зданий, улиц, дорог и площадей населенных пунктов.

Основные принципы построения норм освещенности с 1928 г. изменились лишь незначительно. За редкими исключениями нормы устанавливают наименьшую освещенность. Это следует понимать так, что во все время нормальной эксплуатации осветительной установки и во всех точках освещаемой поверхности освещенность не должна быть ниже установленных нормами значений. Вместе с тем произвольное увеличение освещенности сверх этих значений не должно допускаться.

* В дальнейшем, для краткости, нормы [1] будем называть «нормами СНиП» или просто «СНиП».

Нормы промышленного освещения построены на основе классификации работ по определенным количественным признакам. Ведущим признаком, определяющим разряд работ, является наименьший размер различаемых деталей, что при расчетном расстоянии до глаз 0,5 м определяет их угловой размер. При размере деталей менее 0,15 мм работы относятся к разряду I, при бóльших размерах — соответственно к разрядам II—VI, причем последний разряд относится к работам, при которых различаются детали более 5 мм.

Каждый разряд разбит на 4 подразряда (от «а» до «г») в зависимости от коэффициента отражения фона и контраста между деталями и фоном. Разряд VI подразрядов не имеет. Для остальных, низших, разрядов дается лишь словесная характеристика работ. К разряду VII, в частности, относятся работы с самосветящими поверхностями. Здесь относительно высокая освещенность необходима для уменьшения контраста между деталями и фоном, без чего первые могут стать слепящими (достаточно вспомнить, что светящая нить лампы накаливания на фоне снега, освещенного солнцем, почти не видна).

Разряд VIII относится к работам, где требуется лишь общее наблюдение за производственным процессом.

Для высших разрядов, до Vб включительно, устанавливаются различные значения освещенности в зависимости от того, применяется ли система общего или комбинированного освещения (см. § 2-2). Как было сказано, нормы освещенности могут рассматриваться как компромисс между желаемым и возможным, при комбинированном же освещении легче создать высокие освещенности, чем при общем, тем более, что материальные затраты на устройство местного освещения мало зависят от уровня освещенности. Есть и другая причина: хотя при комбинированном освещении относительно легче выполнить некоторые специальные требования к качеству освещения, в гигиеническом отношении оно несколько хуже, чем общее, что и компенсируется повышением норм освещенности.

Основные нормы СНиП относятся к установкам с газоразрядными источниками света, для случая же применения ламп накаливания устанавливаются пониженные значения освещенности. Это опять-таки объясняется тем, что при малоэкономичных лампах накаливания компромисс между желаемым и возможным наблюдается при меньших освещенностях. Вторая причина, имеющая место в основном для работ низших разрядов, — это сумеречное впечатление, которое производит люминесцентное освещение при низких освещенностях.

Некоторые нормы СНиП для освещения производственных помещений приведены в табл. 2-1.

Дополнительные факторы, имеющие значение при выборе освещенности, было бы сложно включить в таблицу, и они учитываются особо: при их наличии выбранная по нормам освещенность понижается или повышается на одну сту-

Таблица 2-1

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Фон	Освещенность, лк: комбинированное освещение	Освещенность, лк: общее освещение
Наивысшая точность	Менее 0,15	I	а	Малый	Темный	5000	1500
			б	Малый, средний	Средний, темный	4000	1250
			в	Малый, средний, большой	Светлый, средний, темный	2500	1000
			г	Средний, большой, большой	Светлый, светлый, средний	1500	400
Грубая (очень малой точности)	более 5	VI	—	Независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном		—	150
Общее наблюдение за ходом производственного процесса: постоянное	—	VIII	а	Независимо от характеристики фона и контраста объекта с фоном		—	75
периодическое, при постоянном пребывании людей в помещении			б	То же		—	50
периодическое, при периодическом пребывании людей в помещении			в	»		—	30

пень (шкала ступени для внутреннего освещения: 5—7—10—20—30—50—75—100—150—200—300 лк и т. д.). К повышающим факторам относятся: удаленность рабочей поверхности от глаз до 1 м (при больших расстояниях применяется особая таблица), непрерывный характер работы, повышенная опасность травматизма, повышенные санитарные требования, отсутствие или недостаточность естественного освещения, предназначенность помещения для работы или обучения подростков. Понижающими факторами являются кратковременность пребывания людей в помещении и наличие оборудования, не требующего постоянного наблюдения. Нормами предусмотрен определенный порядок совместного учета этих признаков.

В таблице норм освещенности для работ, выполняемых вне зданий, характеристикой разрядов являются только угловые размеры различаемых деталей. Эти нормы даются только для системы общего освещения и сохраняются неизменными при любых источниках света. Для дорог и проездов на территории предприятий нормы устанавливаются в зависимости от назначения освещаемого объекта. О нормах освещения населенных пунктов см. в § 7-5.

Для выбора освещенности по основной таблице СНиП надо знать характеристики рабочего процесса, но даже такое знание не всегда позволяет уверенно выбрать разряд и подразряд работы. Если при лабораторных исследованиях легко воссоздать работы с точно известными характеристиками, то на практике это далеко не так. В процессе одной и той же операции фактически приходится различать детали разных угловых размеров, разно контрастирующие с фоном, и чем более дифференцированы нормы, тем труднее ими пользоваться.

Поэтому нормы СНиП в основном используются как первоисточник для составления отраслевых норм или ведомственных рекомендаций, которые содержат значения освещенности и других характеристик освещения уже для конкретных помещений и рабочих мест. При составлении этих «вторичных» документов допускаются, по согласованию с утверждающими инстанциями, и отдельные отступления от норм СНиП, если работа имеет особенности, не учтенные последними. В практике проектирования, эксплуатации и надзора используются почти исключительно вторичные документы.

Уже и в самих нормах СНиП содержатся таблицы, устанавливающие освещенность для непроизводственных помещений и участков открытых пространств «поименно», в дальнейшем же предполагается включить в состав СНиП нормы освещенности для типичных рабочих поверхностей всех отраслей промышленности.

Нормы освещенности для непроизводственных помещений содержатся в Инструкции по проектированию электрооборудования общественных зданий массового строительства ВСН 19-74 [4].

Нормирование освещенности для непроизводственных помещений как в СНиП так и в ВСН 19-74 имеет некоторые особенности. Освещенность устанавливается только для системы одного общего освещения, которое здесь является основным, хотя в некоторых случаях может дополняться местным освещением (см. § 2-2). Значения освещенности указаны только для освещения газоразрядными лампами, но отмечена возможность понижения их на две ступени при использовании ламп накаливания.

Сколь бы обширной и авторитетной ни была документация, посвященная нормированию освещения, ее не следует считать исчерпывающей. Можно только приветствовать критическую оценку норм в процессе эксплуатации установок, а также в отдельных случаях установление целесообразного значения освещенности путем индивидуальных исследований.

В последнее время в практику нормирования и устройства осветительных установок внедряется термин *совмещенное освещение*, требования к которому отражены в последней редакции норм СНиП.

Совмещенное освещение — освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется *искусственным*, т. е. искусственное освещение функционирует и в светлое время суток.

Нормы как естественного, так и совмещенного освещения содержат требования к значению коэффициента естественной освещенности (КЕО), под которым понимается отношение естественной освещенности в данной точке помещения и в данный момент времени к освещенности в тот же момент под полностью открытым небосводом.

В строительном отношении обеспечение нормированных значений КЕО часто оказывается затруднительным. В нормах допускается предусматривать совмещенное освещение в производственных помещениях, где выполняются работы I и II разрядов; где по условиям технологического процесса, организации производства или климата требуются объемно-планировочные решения, которые не позволяют обеспечить нормированных значений КЕО, а также для отдельных сооружений ряда отраслей промышленности, утвержденных в установленном порядке.

Совмещенное освещение допускается предусматривать в помещениях жилых, общественных и вспомогательных зданий, когда это требуется в строительном отношении. Нормы запрещают применение совмещенного освещения для жилых комнат, помещений для пребывания детей, учебных помещений, палат лечебных и профилактических заведений и т. п.

При выполнении совмещенного освещения искусственное освещение должно выполняться источниками света, спектр которых насколько возможно по условиям среды приближен к спектру естественного света. Требования, предъявляемые к искусственному освещению, — общие для всех случаев и выбираются в соответствии с требованиями соответствующих разделов СНиП.

Поскольку нормированные значения освещенности должны быть обеспечены во все время нормальной эксплуатации установки, а ряд причин вызывает постепенное уменьшение освещенности, начальная освещенность должна быть больше нормированной, а именно равна последней, умноженной на коэффициент

запаса k, значения которого также регламентированы СНиП. Этот коэффициент учитывает снижение потока источников света к концу срока службы, запыление светильников, старение последних, т. е. ухудшение характеристик, не восстанавливаемое очисткой, и снижение коэффициентов отражения стен и потолков помещений. Общий признак этих факторов — их монотонное уменьшающее воздействие на освещенность в ходе времени. Другие факторы, не отвечающие этому признаку, или не учитываются, или по возможности исключаются, или учитываются особо. Так, не учитываются кратковременные отклонения напряжения, длительные же отклонения должны или устраняться, или учитываться принятием при расчете уменьшенного потока ламп; замутнение атмосферы некоторых цехов может учитываться отдельным коэффициентом и т. д.

Необходимый коэффициент запаса зависит от количества и характера пыли в воздухе, степени старения данного типа источников света (в связи с чем для газоразрядных ламп коэффициент запаса повышается), типа светильников, и, конечно, периодичности очистки последних. При установлении нормативных значений коэффициента запаса сопоставляется стоимость очистки при разной ее частоте и затраты, связанные с увеличением значений k, так что последние, в принципе, должны соответствовать оптимальному режиму эксплуатации.

В зависимости от указанных обстоятельств значение k обычно принимается в пределах 1,3—2. Не оправдано излишнее дифференцирование значений k, так как влияющие на него факторы известны лишь приближенно и поскольку самые нормы освещенности не могут быть обоснованы с высокой точностью.

2-2. СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Задача освещения помещения и находящихся в нем рабочих мест может быть решена путем устройства или общего освещения, или комбинированного освещения, т. е. совокупности общего и местного освещения.

О б щ и м называется освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения, как занятую оборудованием и рабочими местами, так и вспомогательную, м е с т н ы м — освещение, предназначенное только для определенного рабочего места и не создающее необходимой освещенности даже на прилегающих к нему площадях.

Устройство одного только местного освещения запрещено нормами: не говоря уже о том, что практически всегда необходимо осветить не только зону непосредственной работы, но и примыкающие к ней площади, при одном местном освещении затрудняется работа глаза, в поле зрения которого оказываются значительные контрасты. Исследованиями показано, что при неизменной суммарной освещенности рабочего места увеличение, в известных

пределах, доли освещенности, создаваемой общим освещением, ведет к повышению производительности труда и уменьшению утомления.

Нормы предъявляют следующие требования к освещенности, создаваемой общим освещением в системе комбинированного освещения.

В помещениях, имеющих естественное освещение, общее освещение в системе комбинированного должно создавать на рабочих поверхностях 10% освещенности, установленной нормами для комбинированного освещения, и, кроме того, эта освещенность должна быть не менее 150 лк при газоразрядных лампах и не менее 50 лк при лампах накаливания. Не требуется создавать общим освещением более 500 лк при газоразрядных лампах или 100 лк при лампах накаливания. В производственных помещениях с постоянным пребыванием работающих при отсутствии в них естественного освещения доля общего освещения в системе к о м б и н и р о в а н н о г о приведена в табл. 2-2 [1].

Таблица 2-2

Разряд зрительной работы	Освещенность, лк, от светильников общего освещения в системе комбинированного	
	при газоразрядных лампах	при лампах накаливания
Iа	750	300
Iб, IIа	600	300
Iв, IIб	500	300
Iг	300	200
IIв, IIIа	400	300
IIг, IIIб, IIIв, IIIг, IV Vа, Vб	200	150

Приведенные значения вычисляются от освещенности, нормированной для тех источников света, которые применены для местного освещения.

Пусть, например, в помещении с естественным освещением выполняются работы разряда IIв и местное освещение выполняется лампами накаливания. Норма комбинированного освещения составляет 2000 лк, откуда 10% составит 200 лк. Если общее освещение выполняется газоразрядными лампами, то принимается именно это значение если же освещение выполняется лампами накаливания, то учитывается, что освещенность может не превышать 100 лк.

Выбор между устройством одного общего или комбинированного освещения — достаточно сложная задача, решение которой не всегда очевидно и должно основываться на учете ряда факторов: психологических, физиологогигиенических, экономических, конструктивных и даже социальных.

Некоторые, преимущественно работники умственного труда, иногда высказываются в пользу одного местного освещения, которое позволяет им лучше сосредоточиться на работе. Психологически это понятно, но тем не менее вредно для зрения и не должно допускаться. Когда при реконструкции освещения некоторых библиотек, имевших ранее только местное освещение, устраивалось одно общее освещение, читатели быстро привыкали к нему и признавали его преимущество.

Устройство в помещении, где работает много людей, одного общего освещения, психологически подчеркивает единство коллектива, напротив, светильники местного освещения, установленные над столиками в ресторане, как бы отделяют данную группу людей от всех остальных.

Свойственная одному общему освещению относительная равномерность распределения яркости в поле зрения гигиенически имеет положительное значение, но получение очень высоких освещенностей при общем освещении затруднительно. Одним из основных достоинств местного освещения является возможность легко удовлетворить некоторые специфические требования к качеству освещения, например получить определенное или изменяемое по ходу работы направление света.

При общем освещении обычно не встречает затруднений ограничение пульсации освещенности на рабочем месте в случае применения газоразрядных ламп, питаемых переменным током, при местном же освещении для этого обязательно применение двухламповых светильников (при токе промышленной частоты).

Нередко недостатком местного освещения оказывается загромождение светильником рабочей зоны, а при использовании ламп накаливания — также нагрев головы работающего тепловой радиацией.

Массовых опросов рабочих о том, какую систему освещения они предпочитают, насколько известно, не производилось, но есть основания утверждать, что если система одного общего освещения удовлетворяет всем требованиям в отношении уровня освещенности и качества освещения, то она получает высокую оценку, вплоть до того, что даже имеющиеся светильники местного освещения не используются.

В экономическом отношении вопрос также не имеет единого решения. Обычно при комбинированном освещении расход энергии меньше, чем при одном общем, так как высокая освещенность создается в пределах небольших площадей, но показатели в значительной мере зависят от плотности расположения рабочих мест.

Пусть, например, работа в помещении относится к разряду IIIб. При одном общем освещении газоразрядными лампами необходима освещенность 300 лк, для чего при определенном типе светильника и размерах помещения потребна удельная мощность 16 Вт/м². При комбинированном освещении общее освещение может быть снижено до 150 лк (8 Вт/м²), но на каждом рабочем месте устанавливаются лампы накаливания 40 Вт. Легко подсчитать, что в обоих вариантах установленная мощность будет одинаковой, если на каждое рабочее место приходится площадь 5 м².

При большей плотности рабочих мест энергетически выгоднее одно общее освещение.

Первоначальные затраты обычно выше при системе комбинированного освещения, так как стоимость устройства общего освещения снижается в меньшей степени, чем значение освещенности, стоимость же оборудования местного освещения (светильники, кронштейны для них, трансформаторы) довольно высока.

Нормы СНиП в отношении выбора системы освещения ограничиваются рекомендацией применять, как правило, систему комбинированного освещения для работ разрядов от I до Vб включительно, допуская обоснованные исключения.

Предпочтение авторами СНиП комбинированного освещения в известной степени субъективно и объясняется тем, что они преимущественно изучали работы с повышенными требованиями к качеству освещения. Действительно, при наличии таких требований и при невозможности удовлетворить их в системе одного общего освещения обязательность применения комбинированного освещения не может оспариваться, в остальных же случаях, даже для работ указанных разрядов, причинами для устройства одного общего освещения могут быть:

доказанная экономическая предпочтительность одного общего освещения;

большие размеры освещаемых поверхностей, делающие целесообразным применение общего локализованного освещения;

неблагоприятные условия среды в помещении и, в частности, в рабочей зоне; этот фактор может иметь значение, так как сортамент светильников общего освещения в отношении пригодности их при различных условиях среды значительно шире, чем сортамент светильников местного освещения;

конструктивная трудность или невозможность установки светильников непосредственно у рабочих мест;

эстетические соображения.

В духе вышесказанного трактуется вопрос и в Инструкции по проектированию силового и осветительного электрооборудования производственных предприятий СН 357-77 [5].

В ряде случаев выбор системы освещения предрешается тем, что технологическое оборудование поставляется заводами-изготовителями уже укомплектованным устройствами местного освещения, как это имеет место, в частности, в отношении металлообрабатывающих станков. В этих случаях имеется возможность подойти к конструированию системы местного освещения с наибольшей глубиной и создать рациональное типовое решение.

В помещениях, где выполнение основных работ предусматривается при одном общем освещении, могут встретиться единичные поверхности, для которых необходимо местное освещение. Так, для щитов с приборами и аппаратурой, установленных в электропомещениях, обычно предпочитается общее освещение, при установке же подобных щитов в цехе часто оказывается, что общее освещение цеха не обеспечивает необходимой освещенности на вертикальной поверхности щита и здесь необходимо местное освещение.

В помещениях конторского или лабораторного характера для общего освещения нормируется освещенность, обеспечивающая нормальные условия работы, но здесь могут встретиться отдельные рабочие места, либо неудачно расположенные по отношению

к светильникам общего освещения (стол стоит в углу и на него падает тень от корпуса работающего), либо выделяющиеся сложностью зрительной задачи (титровальные работы в лаборатории, разбор старинных манускриптов в библиотеке). Для подобных работ также необходимо местное освещение. Во всех указанных случаях местное освещение называется дополнительным и его наличие не налагает каких-либо требований на освещенность от общего освещения.

Разновидностью местного освещения является так называемое переносное (устаревший термин — ремоитное) освещение, осуществляемое ручными, переносными или переставными светильниками, включаемыми через контактные разъемные соединения.

Во многих случаях, особеино в автоматизированных цехах, нормальная работа на станках требует меньшей освещенности, чем работы, выполняемые при наладке. Крупное технологическое оборудование часто имеет внутренние полости, недоступные для общего освещения, так что при их осмотре приходится пользоваться ручными светильниками. Они необходимы также при некоторых разметочных, формовочных и других работах. В помещениях, имеющих бункеры, чаны, отстойники и прочие производственные емкости, для их освещения не всегда может быть применено постоянное встроенное освещение и часто их осмотр производится при переносном освещении.

При проектировании устройство переиосиого освещения имеет, помимо прочего, так изываемое «страховочиое» значение: если определенно известно, что та или иная поиерхность требует усиленного освещения, то следует освещать ее постояиными светнльниками, если же такой определенности нет, то предусмотреиное «на всякий случай» контактиое разъемное соединеиие может быть использовано для присоединения не только переносных, но и стационарных светильников местного освещения.

В результате всего сказаиного устройство переносного освещения можно считать необходимым в цехах и других помещениях, где имеется механическое или электрическое оборудование или же производствеиные емкости, а также там, где работы, хотя бы и иемеханизированиые, могут потребовать временного усиления освещенности. Следует, однако, отметить исключения: так, встречаются цехи, в которых для основной работы необходима высокая освещенность от общего освещеиия, оборудование же не имеет полостей, недоступиых общему освещеиию, что делает такое освещение достаточным для выполнения всех работ по обслуживанию оборудования.

Нормальной считается длина шлангового провода ручных светильников 10 м, что, как правило, должно учитываться при размещении контактных разъемных соединений. Однако в пролетах большой ширины с учетом нежелательности установки разъемных соединений в полу приходится ориентироваться на неизбежное увеличение радиуса действия разъемных соединений (учтено в Инструкции [5]). В галереях и туннелях при длине их

не более 40 м допускается установка контактных разъемных соединений только по концам.

В цехах с технологическими печами (мартеновские печи, печи для обжига или сушки материалов и т. п.) и в некоторых других случаях прн ремонте одновременно используется несколько переносных светильников или даже временно устанавливаются многоламповые гирлянды; в таких случаях устанавливаются блоки контактных разъемных соединений или специальные подключательные пункты.

Помещения, в которых имеется переносное освещение, не считаются оборудованными комбинированным освещением.

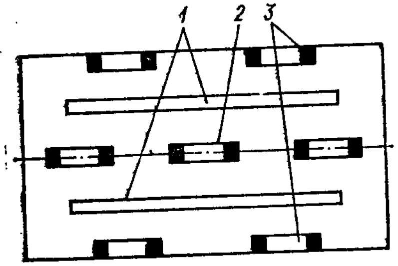

Рис. 2-1. Локализованное освещение электрощитового помещения

1 — щит; 2 — подвесные светильники; 3 — настениые светильиикн

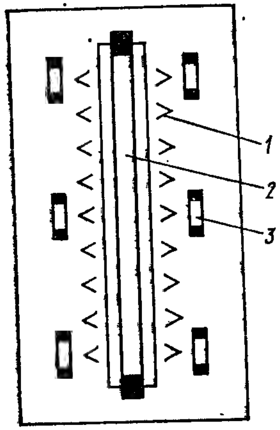

Рис. 2-2. Освещение работ у конвейера

1 — рабочие места; 2 — светильники освещения конвейера; 3 — светильники общего равномерного освещения

Общее освещение, в том числе устраиваемое в системе комбинированного освещения, может быть равномерным или локализоваиным. Иногда последнее определяют как общее освещение с несимметрично расположенными светильниками. Так, например, установленные вдоль одной из стен помещения и направленные на потолок для создания отраженного освещения зеркальные лампы расположены несимметрично, но такое освещение можно признать равномерным. Наоборот, ряды светильников полуширокого светораспределения, симметрично расположенные над проходами между рядами чертежных столов, скорее всего следует считать локализованным освещением.

Таким образом, определяющим признаком локализованного освещения надо признать распределение светового потока источников света с учетом расположения рабочих мест и требований, предъявляемых к их освещению.

Характериыми схемами устройства локализованного освещения являются:

1. Индивидуальный выбор расположения светильников или их групп с учетом расположеиия рабочих мест, а также с учетом необходимости создать хотя бы меньшую освещенность по всей площади помещения. Так, на рис. 2-1 светиль-

ники, установленные перед распределительным щитом, размещены так, чтобы создать необходимую освещенность на вертикальной поверхности щита и исключить зеркальное отражение света в направлении глаз работающих, а светильники за щитом, на стене, хорошо освещают заднюю поверхность щита. Но одновременно первые светильники освещают вспомогательные площади помещения, а вторые — проход за щитом.

2. Устройство общего равномерного освещения в качестве как бы фона, к которому добавляются светильники для определенных рабочих мест. На рис. 2-2, кроме равномерно расположенных светильников, освещающих всю площадь помещения, показан ряд светильников, установленных на уменьшенной высоте и предназначенных для освещения рабочих мест, расположенных вдоль конвейера.

3. Увеличение или уменьшение мощности светильников или высоты подвеса части симметрично расположенных светильников.

В некоторых случаях помещение, не разделенное перегородками, имеет четко разграниченные участки разного назначения: станочные и сварочные, сборочные и складские и т. д. В таких случаях освещение может быть равномерным в пределах каждой части, но локализованным для помещения в целом. В подобных случаях следует, однако, в возможных пределах сохранять единство решения для помещения в целом, в частности выдерживать для всего помещения определенные продольные ряды светильников, изменяя лишь расстояния между светильниками в ряду или мощности ламп.

Создавая, как правило, повышенное качество освещения и будучи экономичнее, чем равномерное освещение, локализованное освещение почти всегда предпочтительнее (в том числе в системе комбинированного освещения) и отказ от него оправдан лишь в следующих случаях:

1) при вероятных в процессе эксплуатации перепланировках оборудования;

2) при возможности выполнения однотипных работ по всей площади помещения без определенных при этом требований к направлению света;

3) для проходных и вспомогательных помещений;

4) при необходимости в силу эстетических соображений иметь равномерное расположение по всей площади помещения светильников одного типа и мощности, например в большинстве помещений общественных зданий и административно-бытовых корпусов.

2-3. ВИДЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Освещение, нормально функционирующее в помещениях или на открытых пространствах, называется рабочим. Во многих случаях аварийное отключение этого освещения по тем или иным причинам может вызвать нежелательные, а то и недопустимые последствия, и возникает необходимость кроме рабочего освещения иметь также аварийное или эвакуационное.

В зависимости от характера освещаемого объекта это освещение согласно нормам должно служить различным целям:

1. Обеспечить безопасное пребывание людей в помещении (или на участке территории) или их безопасную эвакуацию. Для этого во всех случаях должны быть освещены проходы в помещении, а для эвакуации людей из здания — также все пути движения по направлению к основным и запасным выходам, причем (в нормах нет такого требования для всех случаев) все промежуточные и выходные двери должны быть отмечены сигнальными фонарями или освещенными знаками.

Этот вид аварийного освещения называется аварийным освещением для эвакуации людей. Нормы требуют, чтобы в этом случае по линиям проходов была обеспечена освещенность не менее 0,5 лк в зданиях и 0,2 лк на открытых пространствах.

2. Обеспечить возможность временного продолжения работы или хотя бы доведения ее до определенного состояния. Этот вид освещения, т. е. аварийное освещение для продолжения работы, должен создавать на рабочих поверхностях 5% освещенности, нормируемой для рабочего освещения, при системе общего освещения, но не менее 2 и не более 30 лк в зданиях и, соответственно, 1 и 5 лк на открытых пространствах. Эти значения достаточны, так как при них для большинства зрительных задач видимость уже существенно больше единицы, а об остальных функциях зрения при кратковременном режиме можно не беспокоиться.

Намечается в дальнейшем для первого из указанных видов аварийного освещения принять термин «освещение безопасности», для второго же — сохранить термин «аварийное освещение».

Эвакуационное аварийное освещение в зданиях или на открытых пространствах должно устраиваться во всех случаях в местах, опасных для прохода людей (в том числе — из-за продолжения работы производственного оборудования), по путям эвакуации людей из зданий, где одновременно находится более 50 чел., во всех производственных помещениях с числом работающих более 50 чел., в непроизводственных помещениях, где одновременно находится более 100 чел., и на лестницах жилых домов высотой 6 и более этажей.

Разрешается не устраивать стационарного аварийного освещения и заменять его переносными светильниками с автономными источниками питания в одноэтажных зданиях площадью застройки не более 250 м² при отсутствии в них взрывоопасных помещений.

Аварийное освещение для продолжения работы должно устраиваться в зданиях и на открытых пространствах, если прекращение нормального обслуживания оборудования из-за погасания рабочего освещения может вызвать взрыв, пожар или отравление людей, длительное нарушение технологического процесса, нарушение работы жизненно важных центров городов и предприятий (узлы связи, объекты электро- и водоснабжения, центральные диспетчерские пульты и т. п.), опасность травматизма в местах большого скопления людей, нарушение нормального обслужи-

вания больных в операционных блоках, кабинетах неотложной помощи и приемных покоях.

Некоторых пояснений требует формулировка «длительное нарушение технологического процесса». Даже при ручных, немеханизированных работах каждый перерыв в работе ведет к недоотпуску продукции, но здесь имеется в виду другое, а именно случаи, когда перерыв в действиях персонала ведет к прекращению нормального хода процесса на время, существенно превышающее допустимую длительность этого перерыва, крупному браку, порче оборудования или сырья и т. д. Подобные обстоятельства имеют место во многих цехах металлургической, химической и некоторых других отраслей промышленности.

При достаточной четкости нормативных формулировок они не могут все же дать для всех случаев однозначное решение и поэтому конкретизируются и дополняются в отраслевых нормах. Одним из определяющих признаков необходимости устройства аварийного освещения является отнесение силовых электроприемников к первой или особой категориям по степени надежности электроснабжения, что требует обеспечить равную степень надежности и их освещения.

Необходимость установки сигнальных фонарей у выходов предусмотрена нормами только для зрелищных предприятий, для производственных помещений без естественного освещения площадью более 150 м^2 и других помещений, где могут одновременно находиться более 100 чел.

Бесспорно, что сигнальные фонари должны выделяться своей цветностью, однако какой именно должна быть их цветность, не вполне ясно. Прежние редакции нормативных документов и некоторые зарубежные материалы указывают на зеленый цвет, как символизирующий свободный путь, однако в практике, например, зрелищных предприятий преобладает красный цвет, менее других нарушающий состояние темновой адаптации.

Аварийное освещение только тогда оправдывает свое назначение, когда его питание электроэнергией в достаточной степени резервировано (см. § 5-2). В этой связи надо отметить, что никакое резервирование питания рабочего освещения не устраняет необходимости устройства аварийного освещения, так как авария может возникнуть в низших, обычно нерезервированных, звеньях сети рабочего освещения (щитки и групповые сети).

Одним из наиболее надежных решений является применение для аварийного освещения светильников с автономным питанием, т. е. имеющих встроенную аккумуляторную батарею. Такие светильники широко распространены за рубежом. Светильники аварийного освещения должны функционировать во все время действия рабочего освещения либо автоматически включаться при аварийном отключении последнего.

В большинстве случаев в помещениях устраивается какой-либо один вид аварийного освещения. Если оно предназначено для продолжения работы, то прежде всего должна быть обеспечена освещенность рабочих поверхностей путем установки светильников равномерного, локализованного или местного освещения; при размещении светильников должна быть учтена необходимость освещения также проходов. Эвакуационное освещение может быть ограничено установкой светильников только по линиям проходов.

Встречаются, однако, случаи, когда в пределах даже одного помещения устраиваются две раздельные сети аварийного освещения. В основном это имеет место для объектов, особая ответственность которых требует для резервирования питания аварийного освещения так называемого третьего независимого источника энергии, а последний имеет ограниченную мощность (местная аккумуляторная батарея) или территориально удален. В подобных случаях кроме обычного аварийного освещения устанавливается минимальное число маломощных светильников, автоматически включаемых в аварийном режиме.

В зданиях без естественного освещения, в помещениях, где может находиться одновременно более 100 чел., Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [6] требуют, чтобы независимо от наличия аварийного освещения для продолжения работы по основным проходам предусматривалось эвакуационное освещение, автоматически переключаемое на третий внешний или местный независимый источник энергии.

Для аварийного освещения предпочтительно использование тех же источников света, которые применены для рабочего освещения, вообще же могут применяться любые источники, безусловно надежные в данных условиях и обеспечивающие быстрое перезажигание при мгновенных перерывах питания, происходящих при коммутационных операциях. Соответственно этому лампы накаливания могут применяться во всех случаях, газоразрядные лампы — только при условии питания их в том режиме, в котором они должны быть включены, т. е. переменным током напряжения не ниже 90% номинального, причем лампы ДРЛ и ДРИ — только в специальных схемах, обеспечивающих быстрое перезажигание.

Для аварийного освещения могут устанавливаться либо дополнительные светильники, либо может использоваться часть светильников рабочего освещения. Сравнительная экономичность обоих вариантов зависит от того, производится ли в помещении круглосуточная работа и какова мощность ламп рабочего освещения.

Дело в том, что для создания относительно небольших освещенностей, установленных для аварийного освещения, достаточны относительно маломощные, редко расположенные светильники. Светильники рабочего освещения обычно значительно мощнее, но, как следует из теории наивыгоднейшего расположения светильников, расчетное расстояние между светильниками не увеличивается пропорционально мощности ламп и в случае использования для аварийного освещения части светильников рабочего освещения общая мощность аварийного освещения существенно возрастает.

Покажем это на примере. Светильники типа ППР-100, установленные на высоте 5 м, обеспечивают освещенность 0,5 лк при коэффициенте запаса 1,5, если расстояние между соседними светильниками составляет 20 м. Если для рабочего освещения применены светильники УПД с лампами 500 Вт, то для создания той же освещенности они должны быть установлены на расстоянии 30 м, так что мощность на единицу длины возрастает с 5 до 17 Вт.

Наличие дополнительных светильников аварийного освещения практически не позволяет уменьшить мощность рабочего освещения, и мощность аварийного освещения также оказывается

дополнительной. В результате в варианте дополнительных светильников несколько возрастает общая мощность ламп в помещении, в варианте же выделенных светильников возрастает мощность аварийного освещения.

Принято считать, что аварийное освещение функционирует во все темное время суток, включая нерабочее время. Отсюда вытекает рекомендация устанавливать дополнительные светильники только в зданиях с некруглосуточной работой, а в остальных случаях — для рабочего освещения используются лампы накаливания мощностью не более 150 Вт или люминесцентные лампы мощностью 80 Вт.

Установка для аварийного освещения дополнительных светильников необходима также в случаях, когда источники света, принятые для рабочего освещения, не могут быть использованы для аварийного освещения, например, когда последнее включается только в аварийном режиме, или когда оно питается от источников ограниченной мощности, или когда различны напряжения сетей рабочего и аварийного освещения.

Если светильники эвакуационного освещения выделены из числа светильников рабочего освещения и в помещении производятся круглосуточные работы, а источник питания аварийного освещения не лимитирован по мощности и не слишком удален, то увеличение мощности аварийного освещения не ухудшает экономических показателей установки. В этом случае для сети аварийного освещения часто выделяется большее число светильников, чем нужно для создания освещенности 0,5 лк, и освещенность доводится до уровня, соответствующего аварийному освещению для продолжения работы и даже выше. Это, конечно, не обязывает осуществлять соответствующее последнему виду аварийного освещения резервирование питания.

В таких случаях, а также если аварийное освещение предназначается для продолжения работы, практикуется выделение на сеть аварийного освещения целых рядов светильников, нормально осуществляющих функции рабочего освещения. При этом исключается необходимость прокладки по общей трассе двух групповых линий: рабочего и аварийного освещения. Если в этом случае для рабочего освещения применены лампы, не обеспечивающие быстрого перезажигания, то, за исключением особо ответственных случаев, можно считать допустимым присоединение к групповым линиям аварийного освещения дополнительных светильников с лампами накаливания, которые на время перезажигания ламп (для широко применяемых ламп ДРЛ и ДРИ время составляет около 10 мин) обеспечивают освещенность, соответствующую хотя бы требованиям к эвакуационному освещению.

На рис. 2-3 показаны характерные схемы устройства аварийного освещения: дополнительные светильники (*а*); светильники, выделенные из числа рабочих (*б*); выделенные на сеть аварийного освещения целые ряды светильников рабочего освеще-

ния (*в*); установка в этих рядах дополнительных светильников с лампами накаливания (кружки с крестиками на схеме рис. 2-3, *г*).

Охранное освещение заводских и других территорий и **дежурное** освещение помещений, строго говоря, не являются видами освещения, но с некоторой условностью могут рассматриваться как таковые.

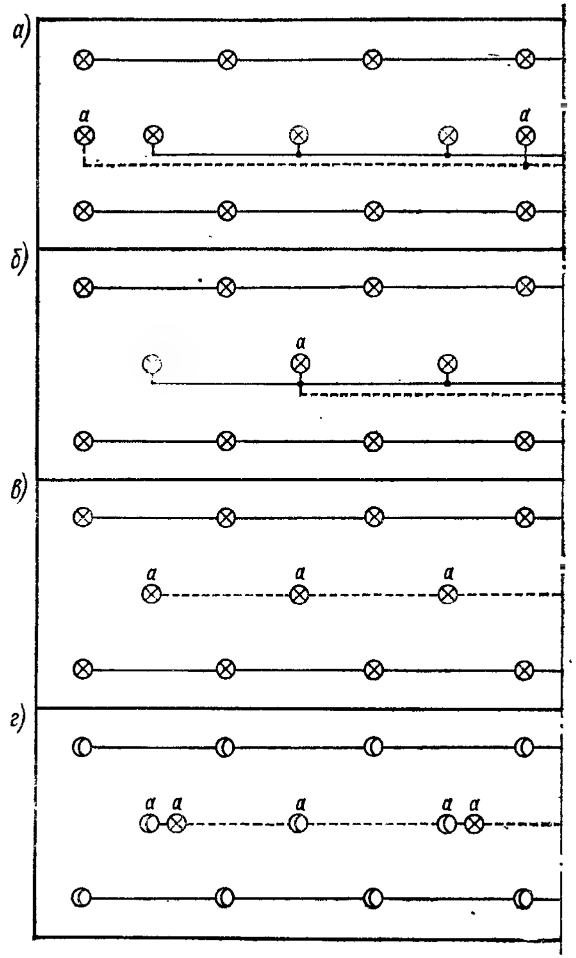

Рис. 2-3. Устройство аварийного освещения

Охранное освещение (§ 7-5) устраивается вдоль линий ограждений и необходимо в случаях, когда имеется постоянное дежурство охраны или устраивается автоматическая охранная сигнализация. Для дежурного освещения в нормах СНиП освещенность не регламентируется. При наличии аварийного освещения светильники или их часть используются в качестве дежурного освещения; в остальных случаях, например в магазинах, дежурное освещение осуществляется выделением на отдельные выключатели части светильников рабочего освещения

или установкой дополнительных светильников. В помещениях, где в нерабочее время нет постоянного дежурства персонала, нежелательно использование для дежурного освещения люминесцентных ламп, так как повышение напряжения в ночное время может быть причиной возгорания ПРА.

2-4. ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Современная техника предоставляет возможность применения в осветительных установках разнообразных источников света, сортамент которых продолжает расширяться. При выборе светильников приходится учитывать их срок службы, световую отдачу, цветопередачу, а также целый ряд других характеристик.

Рассмотрение устройства источников света и происходящих в них физических процессов не входит в задачу данной книги, и мы ограничимся описанием их особенностей с точки зрения использования в осветительных установках.

Лампы накаливания. Основная серия, т. е. лампы общего назначения, выпускается в диапазоне мощности 15—1500 Вт на напряжения 127 и 220 В (некоторая часть ламп выпускается также для напряжений 127—135 и 220—235 В, используется в сетях, где возможно повышенное напряжение и имеет пониженные характеристики). В маркировке ламп буква В обозначает вакуумные лампы, Г — газонаполненные лампы, К — лампы с криптоновым наполнением, Б — биспиральные лампы. Лампы мощностью до 150 Вт могут изготовляться в матированных, молочных или опалиновых колбах; лампы до 200 Вт имеют резьбовой цоколь Е-27; лампы 500 Вт и более — цоколь Е-40; лампы 300 Вт могут иметь любой из этих цоколей.

К основной серии примыкают зеркальные лампы-светильники, имеющие концентрированное, узкое или широкое светораспределение. Широко распространены лампы местного освещения на напряжения 12—24—36 В мощностью до 100 Вт, в том числе лампы-светильники с диффузным или зеркальным покрытием на колбе. Помимо этого, выпускаются лампы самых различных назначений: для прожекторов, автомобилей, судов, иллюминационных установок и др. Эти лампы отличаются номинальными значениями мощности и напряжения, габаритами, формой колбы, типом цоколя и т. д., и, руководствуясь каталогом, можно выбрать подходящую лампу для любого конкретного случая.

Световая отдача ламп основной серии лежит в пределах 7—19 лм/Вт, при теоретическом пределе для источников белого света — около 240 лм/Вт и для светового излучения вообще — 683 лм/Вт. Световая отдача ламп данного типа повышается с увеличением их единичной мощности и снижается с увеличением номинального напряжения. Номинальный срок службы ламп 1000 ч.

По цветности излучение ламп значительно желтее естественного дневного света и при них не обеспечивается правильной цветопередачи.

Элементарная простота схемы включения делает лампы накаливания наиболее надежными источниками света. Лампы практически некритичны к изменениям условий внешней среды, включая температуру, но очень чувствительны к отклонениям подводимого напряжения (рис. 2-4). Отклонению напряжения от номинального на 1% соответствует изменение светового потока на ±3,7%, мощности на +1,5%, световой отдачи на ±2,2%, срока службы на ∓14%.

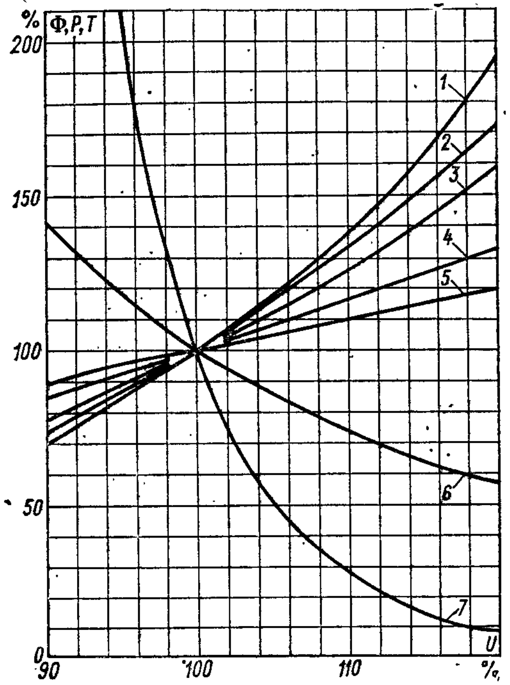

Рис. 2-4. Зависимость характеристик источников света от уровня напряжения

1 — световой поток; 2 — световой поток; 3 — мощность (лампы ДРЛ); 4 — мощность; 5 — световой поток и мощность (люминесцентные лампы); 6 — срок службы (газоразрядные лампы); 7 — срок службы (лампы накаливания)

Разновидностью обычных ламп накаливания являются кварцевые галогенные лампы, происходящий галоидный цикл в которых обеспечивает возврат на нить накала испарившегося с нее вольфрама. В осветительных установках в основном применяются трубчатые лампы типа КГ (кварцевые галогенные), мощностью 1—1,5—2—5 кВт (ожидается увеличение единичной мощности до 20 кВт). Лампы имеют форму трубки из кварцевого стекла с цоколями или вводными проводниками по концам. Лампы исключительно компактны: лампа мощностью 2 кВт имеет диаметр 10,5 мм и длину 335 мм. Световая отдача ламп 22 лм/Вт, срок службы 2500—3000 ч.

Свет ламп КГ значительно белее, чем свет обычных ламп накаливания, и в отношении цветопередачи признается пригодным даже для освещения экспонатов в музеях.

Лампы включаются в сеть непосредственно. Зависимость их характеристик от напряжения примерно такая же, как у обычных ламп накаливания. Нормальное положение при работе — горизонтальное с отклонением на ±4°.

Для специальных целей выпускаются разнообразные типы галогенных ламп накаливания, в том числе малогабаритные, со световой отдачей до 30 лм/Вт, но с укороченным сроком службы.

Люминесцентные лампы. Трубчатые люминесцентные лампы низкого давления, получившие широчайшее применение в осветительных установках, резко отличаются от ламп накаливания по всем своим характеристикам.

Световая отдача ламп достигает 75 лм/Вт. Она различна для ламп разной мощности (достигает максимального значения для ламп 40 Вт) и разного спектрального типа (максимальное значение — для ламп ЛБ, минимальное — для ламп ЛДЦ). Срок службы распространенных типов ламп 10 000 ч, но к концу этого срока световой поток снижается до 60% начального, что учитывается повышенным значением коэффициента запаса.

Лампы выпускаются белого света (ЛБ), холодно-белого света (ЛХБ), дневного света (ЛД), дневного света улучшенной цветопередачи (ЛДЦ), тепло-белого света (ЛТБ), а в последнее время также холодно-белого света улучшенной цветопередачи (ЛЕ или ЛХБЦ). Для рекламы и иллюминации выпускаются также цветные лампы.

Как и все газоразрядные лампы, люминесцентные лампы при питании переменным током дают световой поток, пульсирующий с удвоенной частотой тока. Этот существенный недостаток, однако, довольно легко устраняется (§ 4-2).

Обычные типы ламп предназначены для работы при температуре окружающего воздуха 15—25 °С. При бо́льших или меньших температурах световая отдача ламп снижается, при температурах же, меньших 10 °С, зажигания ламп не обеспечивается. Хотя существуют специальные схемы включения ламп для работы при низких температурах, но их избегают применять в северных широтах как для наружного освещения, так и для освещения неотапливаемых помещений. В жарких помещениях, а также в светильниках с тяжелым тепловым режимом применяются специальные амальгамные лампы (ЛБА), имеющие нормальную световую отдачу при высоких температурах.

Для зажигания и горения ламп необходимо включение последовательно с ними пускорегулирующих аппаратов (ПРА). Схемы и конструкции ПРА чрезвычайно разнообразны и здесь не могут быть рассмотрены подробно. В принципе различаются стартерные аппараты (УБ) и бесстартерные (АБ), причем в первых начальный подогрев электродов обеспечивается кратковременным замыканием контактов стартера, включенного параллельно лампе, во вторых — подачей на электроды напряжения от специальных витков дроссельной катушки. Ранее имевшие место недостатки стартерных схем — повышенная пожарная опасность и относительно меньшая надежность — сейчас устранены, и они имеют преимущественное применение, так как при бесстартерных схемах наблюдаются бо́льшие потери мощности в ПРА, чем в стартерных (соответственно 35 и 25%). Для бесстартерных схем изготовляются лампы со специальной конструкцией электродов, однако могут использоваться лампы стартерного зажигания, но срок их службы сокращается. Использование бесстартерных схем целесообразно в случаях, когда необходимо более быстрое, чем в стартерных схемах, зажигание ламп, а также при затрудненности доступа к лампам для обслуживания.

Кроме того, ПРА разделяются на индуктивные (И), емкостные (Е) и компенсированные (К), на аппараты с нормальным, пониженным (П) и особо низким (ПП) уровнем шума, а также классифицируются по некоторым другим признакам. Применяются также некоторые специальные типы ПРА.

В одноламповых светильниках чаще всего устанавливаются аппараты УБИ и АБИ, в светильниках с четным числом ламп — равное число аппаратов УБИ (АБИ) и УБЕ (АБЕ) или двухламповые компенсированные аппараты 2УБК (2АБК), при которых одна из ламп питается током, отстающим, другая — опережающим напряжение по фазе.

При работе люминесцентных ламп с некомпенсированным ПРА коэффициент мощности комплекта лампа — ПРА в зависимости от мощности ламп находится в пределах 0,5—0,35, при двухламповых компенсированных ПРА — не ниже 0,92, при одноламповых компенсированных — не ниже 0,85.

Влияние отклонений напряжения на работу люминесцентных ламп сказывается меньше, чем на работу ламп накаливания (рис. 2-4), но при напряжении, меньшем 90% номинального, зажигания ламп не обеспечивается.

Работа ламп создает, хотя и незначительные, радиопомехи, распространяемые как по эфиру, так и по сети. Для их снижения в конструкцию стартера входит конденсатор, являющийся в большинстве случаев достаточной мерой защиты.

Сортамент люминесцентных ламп включает прямые лампы мощностью 4, 6, 8, 15, 20, 30, 40, 65, 80 и 150 Вт, а также U-образные лампы 8—80 Вт, W-образные лампы 30 Вт и кольцевые лампы 20—40 Вт. Для общего освещения производственных и общественных зданий наиболее широко применяются лампы мощностью 40 и 80 Вт. Такой же мощностью выпускаются рефлекторные лампы, на колбу которых в пределах двугранного угла 240° нанесен отражающий слой, придающий лампам преимущественно одностороннее светораспределение.

Лампы мощностью 80 Вт позволяют существенно уменьшить потребное число светильников по сравнению с лампами 40 Вт, но они менее экономичны, чем последние, а вследствие их большой длины обслуживание установок с этими лампами осуществляется двумя рабочими. Специфическим преимуществом ламп 80 Вт является большее значение потока на единицу длины, что позволяет уменьшить число рядов светильников в помещении в случае, когда необходимое по расчету число светильников с лампами 40 Вт не вмещается в располагаемую длину ряда. С этой точки зрения перспективным является применение ламп мощностью 150 Вт, у которых поток на единицу длины еще больше, но пока эти лампы имеют недостаточно хорошие технические характеристики.

Внедрение люминесцентных ламп происходило в нашей стране с известной осторожностью и обосновывалось серьезными гигиеническими исследованиями. Это было тем более необходимо, что упорно распространялись слухи о вреде люминесцентного освещения. К настоящему времени эти слухи полностью опровергнуты и безусловно доказана не только безвредность, но и полезность люминесцентного освещения. Количество ультрафиолетовых лучей (избыток которых мог бы быть опасным) в излучении ламп ничтожно мало, и хотя эти лучи учитываются как разрушающий фак-

тор, например при освещении картин, с биологической точки зрения хотелось бы, чтобы лампы излучали их больше.

При освещенности начиная примерно от 100—150 лк люминесцентное освещение обеспечивает бо́льшую производительность труда, чем освещение лампами накаливания при той же освещенности. В тех случаях когда возникали жалобы на люминесцентное освещение, они всегда объяснялись его плохим устройством: недостаточной освещенностью, при которой может создаться впечатление сумеречности, прямой или отраженной блескостью, неустраненными пульсациями освещенности и, особенно, шумом ПРА старых типов.

Лампы ДРЛ. Четырехэлектродные дуговые ртутные лампы высокого давления с люминофорным покрытием на колбе выпускаются в пределах мощностей 80—2000 Вт и имеют световую отдачу 40—60 лм/Вт. Световая отдача возрастает с увеличением единичной мощности, но для чаще применяемых в установках внутреннего освещения ламп 400—1000 Вт почти одинакова.

Срок службы ламп 10 000 ч, причем к концу этого срока световой поток снижается до 70% начального. Лампы включаются через одноламповые индуктивные ПРА, потери мощности в которых составляют около 10%. Коэффициент мощности комплекта лампа — ПРА составляет в среднем 0,5. В последнее время наметилась тенденция встраивания в ПРА конденсаторов для повышения коэффициента мощности до 0,9—0,95. Лампы в комплекте с ПРА предназначены для включения на напряжение 220 В, кроме ламп 2000 Вт, включаемых на линейное напряжение системы 380/220 В. Лампы мощностью 80—125 Вт имеют цоколь Е-27, остальные — цоколь Е-40. Преимуществом ламп ДРЛ по сравнению с люминесцентными лампами является их компактность при высокой единичной мощности, существенным недостатком — плохая цветопередача их излучения, позволяющая применять лампы ДРЛ только при отсутствии каких-либо требований к различению цветов, а также значительные пульсации светового потока (см. § 4-2).

Процесс разгорания ламп после включения длится 5—7 мин. В случае хотя бы мгновенного перерыва питания лампы гасиут и начинают вновь разгораться только после остывания в течение примерно 10 мин. К температуре внешней среды лампы ДРЛ почти не критичны: они надежно зажигаются и горят при температуре до —25 °С, а лампы специального исполнения — и при более низкой температуре. Зависимость их характеристик от напряжения представлена на рис. 2-4. Как и люминесцентные лампы, они надежно работают только при напряжении не менее 90% номинального. Гигиенические исследования не выявили противопоказаний для применения ламп ДРЛ, но привели к выводу, что при зрительных работах высокой точности применение их нежелательно.

Лампы ДКсТ. Из довольно большой серии ксеноновых ламп в осветительных установках получили применение дуговые ксеноновые трубчатые лампы с воздушным охлаждением типа ДКсТ.

В отличие от других газоразрядных ламп эти лампы работают без балласта в виде ПРА, но зажигаются с помощью специального пускового устройства.

Сортамент включает лампы мощностью 5, 10, 20 и 50 кВт (в небольшом количестве выпускаются также лампы 100 кВт). Лампы имеют форму трубок диаметром 22—42 мм и длиной 640—2610 мм. Световая отдача лежит в пределах 20—45 лм/Вт, возрастая с увеличением единичной мощности. Срок службы различных типов ламп лежит в пределах 300—750 ч, но при стабилизации напряжения в пределах ±2% может достигать 3000 ч. Лампы 5 кВт включаются на напряжение 220 В попарно-последовательно, лампы 10 кВт — в сеть 220 В, более мощные лампы — в сеть 380 В.

Область применения ламп ограничивается вредным для людей избытком в их спектре ультрафиолетовых излучений. Правда, относительно недавно начат выпуск ламп в колбе из легированного кварца (лампы ДКсТЛ), в которых этот недостаток устранен.

Пульсации светового потока у ламп ДКсТ особенно велики. Помимо большой единичной мощности, достоинством ламп является тот факт, что их излучение по цветности наиболее близко к естественному, дневному свету, хотя по характеру использования ламп это достоинство обычно не используется. Температура внешней среды не оказывает влияния на зажигание и горение лампы.

Металлогалогенные и натриевые лампы. В последние годы сортамент источников света обогатился новыми типами ламп: металлогалогенными ДРИ и натриевыми высокого давления ДНаТ. Оба типа ламп, несомненно, весьма перспективны, но их сортамент и характеристики еще не установились окончательно, опыт их применения весьма невелик, и по ним могут быть приведены лишь предварительные сведения на основе, в частности, зарубежных публикаций.

Лампы ДРИ являются развитием и усовершенствованием ламп ДРЛ. Добавление в разрядную трубку галоидных соединений различных металлов позволило существенно повысить световую отдачу и улучшить спектральный состав света, который в дальнейшем может стать столь же вариабельным, как спектр люминесцентных ламп.

Уже выпускаемые у нас лампы ДРИ (их мощность 250—400—700—1000—2000 Вт; лампы мощностью 2000 Вт включаются на напряжение 380 В) имеют световую отдачу до 90 лм/Вт, внешне отличаются от ламп ДРЛ только отсутствием люминофора на колбе и дают достаточно белый свет.

Опубликованные как предварительные сроки службы ламп невелики (1000—5000 ч), но, судя по зарубежным данным, могут быть доведены по крайней мере до 10 000 ч (лампы ДРЛ лучших зарубежных фирм имеют срок службы 20 000 ч). Лампы включаются в сеть через ПРА, состоящее из дросселя и зажигающего

устройства УИЗУ, дающего импульсы высокого напряжения. Коэффициент мощности при некомпенсированных ПРА равен в среднем 0,5. Пульсации светового потока значительно меньше, и разгораются лампы ДРИ также несколько быстрее, чем лампы ДРЛ.

Натриевые лампы низкого давления известны уже очень давно. Они имеют рекордную световую отдачу — до 180 лм/Вт, но желтый свет, который они дают, делает их пригодными только для освещения загородных автострад. Широкое применение натриевых ламп стало возможным только после создания ламп высокого давления (ДНаТ) со значительно улучшенным спектром, но все же с преобладанием желтых лучей. По зарубежным данным их световая отдача достигает 140 лм/Вт при сроке службы 20 000 ч. Лампы включаются в сеть так же, как лампы ДРИ, через однофазные индуктивные ПРА. Коэффициент мощности комплекта лампа—ПРА в среднем 0,5. Пульсации светового потока очень велики.

Переходя непосредственно к выбору источников света, надо сказать, что в ряде случаев имеют место обстоятельства, предопределяющие отказ от того или иного источника или, напротив, обязательность его применения. Питание установки в том или ином режиме от сети постоянного тока исключает возможность применения газоразрядных ламп, так же как и вероятность значительных, более чем на 10% понижений напряжения. Необходимость обеспечить мгновенное перезажигание ламп после кратковременного перерыва питания, например при коммутационных операциях, заставляет отказываться от ламп ДРЛ и ДРИ при отсутствии соответствующих схем включения. Возможность изменения температуры окружающего воздуха ниже +10 °С является противопоказанием для применения люминесцентных ламп с обычными схемами зажигания. Необходимость питать лампы напряжением 12—36 В делает обязательным применением ламп накаливания.

В остальном определяющее значение при выборе источников света имеют вопросы цветопередачи и экономики.

В некоторых случаях цветопередачу можно считать безразличной, как, например, в цехах металлургической, машиностроительной (кроме малярных цехов) и некоторых других отраслей промышленности. В помещениях, где одним из основных объектов различения являются лица людей, речь идет не столько о правильной цветопередаче, сколько о наиболее благоприятных условиях различения этих лиц. Для этой цели вполне подходит свет ламп накаливания и люминесцентных ламп ЛТБ.

Наоборот, во многих случаях к цветопередаче предъявляются повышенные, иногда очень строгие, требования, т. е. необходимо, чтобы цвета воспринимались так же, как в средних дневных условиях. Это швейные и меховые фабрики, полиграфические предприятия цветной печати, магазины тканей и верхней одежды, музеи и выставки, а также ряд других объектов.

Все люминесцентные лампы, кроме ЛТБ, дают существенно лучшую цветопередачу, чем лампы накаливания. Так как по ряду причин само понятие «правильная цветопередача» несколько расплывчато, трудно с полной уверенностью ранжировать люминесцентные лампы по этому признаку. В Инструкции СН 357-77 [5] они названы, от лучших к худшим, в порядке: ЛЕ—ЛДЦ-4—ЛХБ—ЛБ—ЛД. Удовлетворительную цветопередачу обеспечивают галогенные лампы накаливания КГ, которые, по-видимому, можно поставить наравне с люминесцентными лампами ЛХБ. Отечественный опыт применения ламп ДРИ еще мал, но в зарубежной литературе они получили высокую оценку. В частности, эти лампы, а также лампы КГ с успехом используются для освещения при цветных телесъемках.

Исключая лампы ДКсТ, почти не используемые для внутреннего освещения, наибольшее приближение к «идеалу» дает сейчас сочетание ламп КГ и ЛДЦ-4 примерно в равных количествах по освещенности.

По мере развития газоразрядного освещения экономические показатели все более изменяются в пользу последнего, чему способствует также сближение норм освещенности для газоразрядных ламп и ламп накаливания, произведенное в последние годы.

Первоначальная стоимость установки, отнесенная к мощности 1 кВт, при использовании газоразрядных ламп выше, чем ламп накаливания. Для люминесцентных ламп это объясняется большим числом маломощных светильников, проходящих на 1 кВт, для ламп ДРЛ — высокой стоимостью самих ламп и ПРА.

Примем, ориентировочно, стоимость оборудования мощностью 1 кВт 150 руб. для ламп накаливания и 300 руб. — для газоразрядных ламп.

Для работ III—VII разрядов по СНиП соотношение между нормами освещенности для газоразрядных ламп и ламп накаливания составляет около 1,5. Если принять соотношение световых отдач тех же ламп, с учетом потерь в ПРА, равным примерно 50 : 15 = 3,3, то получим, что 1 кВт ламп накаливания может быть заменен 0,45 кВт газоразрядных ламп, в результате чего первоначальные затраты будут почти одинаковыми. Расход электроэнергии при газоразрядных лампах будет значительно меньшим, повышенная же стоимость замены ламп компенсируется десятикратным сроком службы этих ламп.

Лампы накаливания могут, однако, оказаться более экономичными для работ разрядов VIII, где соотношение между нормами освещенности лежит в пределах 2,5—5, а также при очень небольшом годовом числе часов использования, когда уменьшается доля, занимаемая и годовых эксплуатационных расходах стоимостью энергии.

Существует мнение, что использование в пределах одного помещения различных источников света, равно как одновременное использование искусственного и естественного освещения вредно. Исследования гигиенистов не подтверждают этого мнения, хотя в известной степени может быть психологически неприятным «двухцветное» освещение из-за различной оценки условий светового комфорта при излучателях с разной цветовой температурой. Во всяком случае нормы не ограничивают применения в одном помещении различных по спектру источников света, но обращают внимание на необходимость ограничения возможных в этом случае разноокрашенных теней. Для этого желательно, чтобы не

менее 80% всей освещенности создавалось какими-либо одними источниками либо чтобы на рабочие поверхности падал уже смешанный; однородный поток. Соответственно разные источники света могут быть применены для рабочего и аварийного освещения или для местного и общего освещения. Смешение потоков разных ламп может потребоваться и в пределах системы общего освещения, например для получения определенного спектрального состава света. В этом случае предпочтительно применять отраженное освещение или же устанавливать лампы разных типов в общих или рядом расположенных светильниках.

Дополнительным подтверждением сказанного является широкое распространение системы совмещенного освещения, при котором светопроемы рассчитываются так, что в глубине помещений естественное освещение оказывается недостаточным и предусматривается включение искусственного освещения даже в светлое время суток (см. § 2-1). В этом случае предпочтительны люминесцентные лампы, спектрально близкие к естественному свету.

Подводя итоги всему сказанному, кратко охарактеризуем применимость источников света для различных случаев.

Общее освещение производственных зданий. Основным источником света для общего освещения производственных помещений, безусловно, стали уже газоразрядные лампы. Нормы требуют применения их, как правило, для общего освещения помещений с работами разрядов I—V и VII, помещений без достаточного естественного освещения с постоянным пребыванием работающих и для общего освещения в системе комбинированного освещения.

Лампы накаливания сохраняют свое значение в основном только для помещений, где производятся грубые работы или осуществляется общий надзор за работой оборудования, особенно если эти помещения не предназначены для постоянного пребывания людей: подвалы, туннели, проходы между фундаментами машин, склады, вентиляционные установки и т. д. Они применяются также в тех случаях, когда использование газоразрядных ламп технически невозможно, например когда светильники для данных условий среды выпускаются только для ламп накаливания.

Определяющее значение при выборе типа источников света имеют высота помещения и требования к цветопередаче. При использовании люминесцентных ламп число светильников всегда значительно больше, чем при использовании ламп ДРЛ, и повышенная трудоемкость их обслуживания особенно сказывается в высоких помещениях, заставляя уже по одной этой причине переходить к лампам ДРЛ или ДРИ. С другой стороны, лампы ДРЛ имеют высокий коэффициент пульсации светового потока, а при малых высотах затруднено принятие мер для уменьшения пульсации освещенности. Оба эти фактора — высота и пульсации — действуют, можно сказать, согласованно.

Помимо малой высоты помещений, применение люминесцентных ламп может быть обусловлено повышенными требованиями

к цветопередаче и выполнением в помещении работ высокой точности, при которых лампы ДРЛ противопоказаны. Основное применение имеют лампы ЛБ, и только при специальных требованиях к цветопередаче — другие типы ламп, кроме ЛТБ.

Галогенные лампы накаливания в установках промышленного освещения не получили широкого применения. Они рекомендуются для высоких помещений при технической невозможности применения газоразрядных ламп и если потребная единичная мощность лампы превышает 1000 Вт, но могут применяться также при повышенных требованиях к цветопередаче, если почему-либо нельзя использовать люминесцентные лампы.

Область применения ламп ДРИ и ДНаТ еще не установилась окончательно. Она будет определяться уровнем их производства, сроком службы и ценами. Несомненно, что эти типы ламп будут вытеснять лампы ДРЛ в высоких помещениях, но можно ожидать, что лампы ДРИ оправдают себя и при повышенных требованиях к цветопередаче.

Эксплуатационный персонал предприятий, заинтересованный в уменьшении числа светильников, требующих обслуживания, нередко высказывается в пользу применения мощных ламп ДКсТ, против чего, однако, есть достаточно серьезные возражения. Нормы допускают их применение в исключительных случаях, по согласованию с органами санитарного надзора и при освещенности не более 150 лк, имея в виду опасность ультрафиолетового переоблучения. Если даже считать, что после расширения выпуска ламп в колбе из легированного кварца эти ограничения будут сняты, то против применения ламп ДКсТ останутся экономические показатели, связанные с их высокой стоимостью, малой световой отдачей, коротким сроком службы. Для ограничения пульсации освещенности потребовалось бы почти всегда устанавливать блоки из трех ламп (питаемых разными фазами трехфазной сети), размещая их на столь значительном расстоянии друг от друга, что создавало бы сильно неравномерное освещение с развитыми тенями. Тем не менее существуют относительно удачные, хотя и с нарушением части нормативных требований, случаи применения ламп ДКсТ в цехах высотой примерно 40 м.

Местное освещение. В настоящее время для местного освещения возможно применение только ламп накаливания или люминесцентных ламп. Последние обязательны при высоких требованиях к цветопередаче и рекомендуются для освещения рабочих мест большой протяженности, а также при работах с блестящими поверхностями. В остальных случаях, а их большинство, сказываются недостатки люминесцентных ламп: большие габариты, необходимость иметь двухламповые светильники для ограничения пульсации освещенности, питание только напряжением 220 В, что заставляет отдавать предпочтение лампам накаливания, лишенным этих недостатков.

Общественные здания. Для основных помещений общественных зданий (включая административные корпуса предприятий) применение люминесцентных ламп является обязательным. Лампы накаливания могут применяться в коридорах, санузлах, гардеробах и т. д., но в целях единообразия решений здесь также чаще всего применяются люминесцентные лампы, так что реаль-

ная область применения ламп накаливания ограничивается только подвалами, чердаками и техническими этажами.

В зарубежной литературе описан ряд случаев освещения общественных зданий лампами ДРИ (применялось отраженное освещение) и даже лампами ДНаТ, причем отмечается, что к своеобразному спектру последних люди быстро привыкают.

В установках архитектурно-художественного освещения общественных зданий выбор источников света производится в индивидуальном порядке, причем некоторое применение получили здесь также галогенные лампы накаливания.

Из числа люминесцентных ламп в общественных зданиях почти исключительно применяются лампы ЛБ. Частой ошибкой является замена в процессе эксплуатации этих ламп на лампы ЛД или ЛДЦ, что ведет к снижению освещенности, увеличению пульсации освещенности и к возможности появления впечатления сумеречности.

О выборе источников света для наружного освещения см. в § 7-5.

2-5. РАСПОЛОЖЕНИЕ СВЕТИЛЬНИКОВ

ОБЩИЕ ПРАВИЛА

Выбор расположения светильников общего освещения является одним из основных вопросов, решаемых при устройстве осветительных установок, влияющим на экономичность последних, качество освещения и удобство эксплуатации.

На рис. 2-5 представлены типичные случаи расположения светильников, где приняты следующие обозначения, которыми в дальнейшем будем пользоваться без пояснений: H — высота помещения, а при ферменном покрытии — высота до затяжки ферм; $h_с$ — расстояние светильников от перекрытия или затяжки ферм; $h_р$ — высота рабочей поверхности над полом; $h_п$ — высота установки светильников над полом; $h = h_п - h_р = H - h_с - h_р$ — расчетная высота; L — расстояние между светильниками или их рядами; L_A, L_B — расстояния между светильниками в направлении вдоль и поперек помещения, если они неодинаковы; l — расстояние крайних рядов светильников от стены; все размеры указываются в метрах.

Из названных размеров H и $h_р$ являются заданными; $h_с$, кроме случаев установки светильников на стенах, принимается в пределах от 0 при установке на потолке или заподлицо с фермами и обычно до 1,5 м. Бо́льшие значения $h_с$, как правило, не рекомендуются, и если они принимаются, то должны быть предусмотрены меры против раскачивания светильников потоками воздуха (необходим жесткий подвес). Расстояние l рекомендуется принимать около $\frac{1}{2}L$ при наличии у стен проходов и около $\frac{1}{3}L$ в остальных случаях. При безусловной необходимости обеспечить у стен такую же освещенность, как по всей площади, расстояние l

может быть уменьшено почти до нуля путем установки светильников на кронштейнах, укрепленных на стенах.

На рис. 2-5, *б* показан «классический» случай равномерного размещения светильников с лампами накаливания или лампами ДРЛ по вершинам квадратных полей. По условиям размещения светильников в конкретных помещениях часто приходится принимать поля прямоугольной формы, причем в этом случае желательно, чтобы отношение $L_A : L_B$ не превышало 1,5.

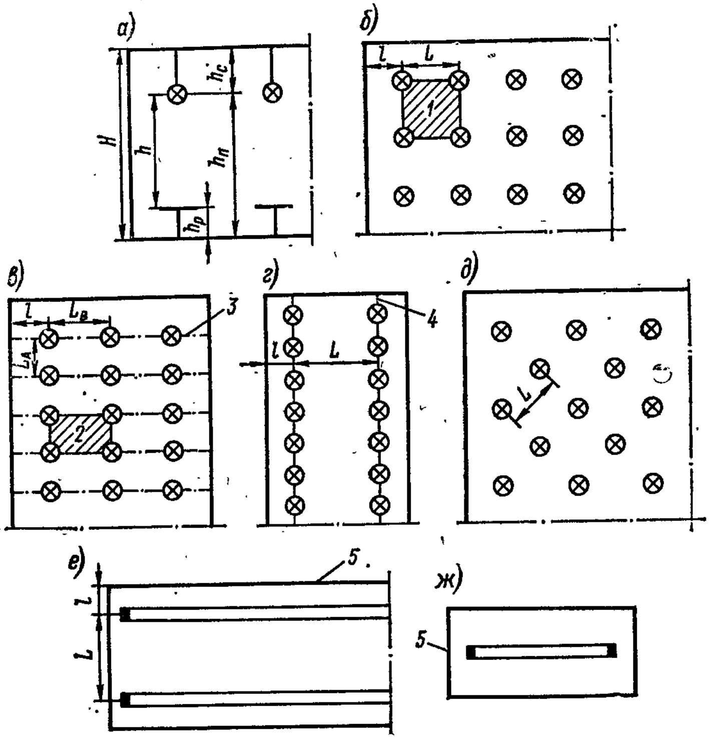

Рис. 2-5. Схемы размещения светильников: *а* — в разрезе; *б* — *ж* — в плане

1 — угловое поле; *2* — одно из центральных полей; *3* — оси ферм; *4* — оси мостиков обслуживания; *5* — стена с окнами

В помещениях с ферменным перекрытием (рис. 2-5, *в*) в большинстве случаев светильники могут устанавливаться только на фермах. В этом случае допустимы и увеличенные значения $L_A : L_B$, так как по сетевым и эксплуатационным соображениям следует по возможности сокращать число продольных рядов светильников. Особенно это важно при наличии специальных мостиков для обслуживания светильников, вдоль которых светильники размещаются, как правило, учащенно (рис. 2-5, *г*). В том же случае

нередко светильники располагаются блоками из 2—4 шт., если это необходимо для снижения коэффициента пульсации освещенности или если наибольшая возможная мощность лампы меньше требуемой по расчету.

На рис. 2-5, *д* показано так называемое «шахматное» расположение светильников, в данном случае по вершинам квадратных, но диагонально расположенных полей. Теоретически оптимальным является шахматное расположение по вершинам ромбов с острым углом 60°. В узких помещениях иногда неизбежно однорядное расположение светильников, но в помещениях, где производятся работы, его следует избегать, так как при нем (и при светильниках прямого света) создаются глубокие тени и не всегда обеспечивается удачное направление света.

Светильники с трубчатыми, т. е. в основном люминесцентными лампами, преимущественно размещаются рядами, желательно параллельными стене с окнами (рис. 2-5, *е*) или длинной стороне узкого помещения (рис. 2-5, *ж*). Расположение светильников по схеме, приведенной на рис. 2-5, *е*, иногда оспаривается архитекторами по эстетическим соображениям как психологически подчеркивающее удлиненность помещения. Но в помещениях, предназначенных для работы, следует, как правило, настаивать на таком расположении: направление света в этом случае приближается к направлению естественного света, облегчается возможность включения в сумерки только освещения в глубине помещения, при обычной ориентации рабочих мест так, что естественный свет падает на них слева, уменьшается прямая и отраженная блескость и, наконец, оказывается меньшей протяженность групповой сети.

В схемах на рис. 2-5, *е* и *ж* ряды предпочтительно выполнять непрерывными, т. е. составлять из стыкованных между собою светильников. Ряды с разрывами допускаются, если это необходимо согласно расчету, но их недостатком является худший внешний вид и возможность возникновения веерных теней. Светильники на 4—10 люминесцентных ламп в административно-бытовых и общественных зданиях располагаются по схеме рис. 2-5, *б*.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СВЕТИЛЬНИКОВ

Если бы ставилась задача создания в помещении наивыгоднейшим образом средней освещенности, без регламентации степени неравномерности, то формально правильным было бы абсурдное решение: установить в центре помещения на наименьшей возможной высоте необходимое число светильников с лампами наибольшей возможной мощности; в этом случае на освещаемую поверхность была бы направлена наибольшая возможная доля всего потока ламп. В действительности в нормах СНиП [1], за редкими исключениями, нормирована наименьшая освещенность поверхности и именно она должна быть достигнута наивыгоднейшим образом.

Вопрос может ставиться по-разному, а именно: могут определяться условия, при которых для решения данной светотехнической задачи необходим минимум светового потока ламп, минимум мощности или минимум годовых эксплуатационных затрат. Соответственно этому можно говорить о светотехнически наивыгоднейшем расположении, энергетически наивыгоднейшем расположении и экономически наивыгоднейшем расположении. Величины, относящиеся к этим случаям, будем обозначать индексами «с», «э» и «о». Решением задачи является обычно определение отношения расстояния между светильниками L к расчетной высоте h, обозначаемого λ. Для нахождения λ, оптимального в определенном отношении, изучается поведение функций экономичности $Э_с$, $Э_э$, $Э_о$, равных или пропорциональных затрате светового потока, электроэнергии или денежных средств на эксплуатацию.

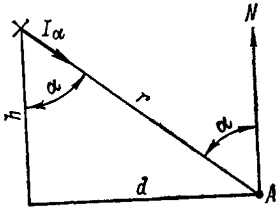

Рис. 2-6. Освещение горизонтальной поверхности

Известно, что экономичность осветительных установок наиболее полно оценивается не по годовым эксплуатационным расходам, а по приведенным затратам, которые учитывают как годовые эксплуатационные расходы, так и часть капитальных затрат, определяемую как стоимость создания осветительной установки, умноженную на нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, принимаемый в соответствии с [7] равным 0,12. Однако применительно к вопросу наивыгоднейшего расположения светильников учет капитальных затрат практически не оказывает влияния на получаемые конечные результаты, в связи с чем для упрощения расчетов оценку вариантов можно производить по годовым эксплуатационным расходам.

Предварительно рассмотрим задачу определения наивыгоднейшей высоты подвеса одиночного светильника, освещающего точку A горизонтальной поверхности, удаленную на расстояние d от проекции светильника на указанную поверхность (рис. 2-6). Примем, что светораспределение светильника подчиняется закону

$$I_\alpha = I_0 \cos^m \alpha. \quad (2\text{-}1)$$

Не требует доказательства, что при $h = 0$ освещенность E также равна нулю и что при $h \to \infty$ освещенность стремится к нулю, а значит, существует определенная высота, при которой освещенность достигает максимума. Представим выражение освещенности в следующем виде:

$$E = \frac{I_\alpha \cos\alpha}{r^2} = \frac{I_0 \cos^{m+1}\alpha}{h^2 + d^2} = I_0 \frac{h^{m+1}}{(h^2 + d^2)^{\frac{m+3}{2}}}.$$

Находя производную освещенности по высоте и приравнивая ее нулю, находим значение наивыгоднейшей высоты

$$h = d\sqrt{\frac{m+1}{2}}. \quad (2\text{-}2)$$

При $m = 0$ имеем равномерное светораспределение и $h = d : \sqrt{2}$, при $m = 1$ — косинусное светораспределение и $h = d$.

Если светильники расположены по вершинам квадратных полей и рассматривается точка, лежащая в центре поля, то $L = d\sqrt{2}$, откуда получаем соотношения: $h = L : 2$ — для равномерного светораспределения и $h = L : \sqrt{2}$ — для косинусного.

Для конкретных светильников может быть определено значение m, наиболее близко соответствующее форме кривой силы света, и по формуле (2-2) — значение h.

Возможен и другой путь. Напишем выражение освещенности в виде

$$E = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{h^2} \equiv \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha\, d^2}{h^2} \equiv \varepsilon \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (2\text{-}3)$$

причем во второй дроби введен произвольный, постоянный в данных условиях, множитель d^2, не изменяющий условий максимума, а знак равенства заменен знаком, которым будем пользоваться для обозначения пропорциональности. Через ε обозначено произведение $I_\alpha \cos^3 \alpha$, имеющее, как далее увидим, большое значение в технике светотехнических расчетов.

Построив теперь кривую функции $\varepsilon \operatorname{tg}^2 \alpha = f(\operatorname{tg} \alpha)$, по положению ее максимума легко найдем наивыгоднейшее значение отношения $\operatorname{tg} \alpha = d/h$.

Этот способ универсален в том отношении, что если использовать для силы света выражение (2-1), то он может быть применен и для обобщенных расчетов.

Рассмотренная задача имеет практическое значение, но при этом не позволяет еще сказать, какое расположение будет оптимальным, если варьируется L при неизменном h, как это имеет место в большинстве случаев.

При данном световом потоке светильника светотехническая экономичность $Э_с$ может быть принята пропорциональной полезному потоку, равному произведению наименьшей освещенности, т. е. освещенности центральной точки поля, на площадь поля:

$$Э_с \equiv EL^2 \equiv \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha\, d^2}{h^2}.$$

Тождественность данного выражения и условия (2-3) показывает, что условия оптимума одинаковы независимо от того, какая величина, L или h, является переменной и подлежит выбору.

Опуская промежуточные расчеты, можно считать, что

$$\lambda_с = \frac{2}{\sqrt{m+1}}. \quad (2\text{-}4)$$

Для случая освещения светящими линиями, в частности для люминесцентных светильников, расположенных по схеме рис. 2-5, е, вывод производится несколько иначе: формула для освещенности имеет иной вид, учитывается кривая силы света только в поперечной плоскости и экономичность $Э_с$ принимается пропорциональной не L^2, а L. Первое и последнее из указанных обстоятельств как бы взаимно компенсируется, и выражение (2-4) оказывается справедливым и для этого случая.

Для наиболее характерных значений ($m = 0$ и $m = 1$) получаем:

$\lambda_с = \sqrt{2}$ — равномерное светораспределение (при $m = 0$);

$\lambda_с = 2$ — косинусное светораспределение (при $m = 1$). Эти соотношения впервые получены Р. А. Сапожниковым.

Физический смысл наивыгоднейшего значения L заключается в том, что при увеличении площади поля начиная от нуля освещенность центральной точки сперва убывает медленнее, чем возрастает площадь поля, после же определенного момента убывание становится столь быстрым, что уже не компенсируется возрастанием площади. Существенно при этом, что наибольшая освещенность имеет место в вершине поля, создается, в основном, одним светильником и при возрастании значения L почти не изменяется, так что с возрастанием L освещение становится все более неравномерным.

В условиях нормирования наименьшей освещенности повышенная неравномерность экономически противопоказана, так как на создание всей освещенности сверх наименьшей формально неэффективно затрачивается световой поток.

Ввиду особой важности этого вопроса проиллюстрируем его также следующим рассуждением.

Пусть узкая полоса освещается рядом светильников, расположенных на наивыгоднейшем расстоянии друг от друга. Выключив светильники через один, расчетом и опытом можем убедиться, что наименьшая освещенность (в данном случае — в точках под выключенными светильниками) уменьшится не в два раза, а значительно больше, например в 5 раз. Для восстановления освещенности на прежнем уровне придется во столько же раз увеличить световой поток лампы в каждом светильнике, причем общий поток ламп в установке значительно возрастет.

При освещении лампами накаливания увеличение значения L сопровождается переходом к лампам все большей мощности и, следовательно, ростом световой отдачи ламп. Это сдвигает максимум экономичности в сторону бо́льших значений L и приводит к несовпадению условий светотехнической и энергетической экономичности.

Приближенно можно принять, что зависимость светового потока ламп накаливания от их мощности P подчиняется выражению

$$\Phi \equiv P^n,$$

в котором для ламп 220 В значение $n \approx 1{,}14$.

Опуская промежуточные рассуждения, можем прийти к выводу, впрочем достаточно очевидному, что условия электрической экономичности определяются максимумом функции

$$Э_э \equiv \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{h^2} L^{2n}.$$

Для конкретных светильников точка максимума может находиться построением функции

$$Э_э = \varepsilon\, \mathrm{tg}^{2n} \alpha;$$

решение же задачи в общем виде дает результат

$$\lambda_э = 2\sqrt{\frac{n}{m + 3 - 2n}}. \qquad (2\text{-}5)$$

Для равномерного светораспределения значение $\lambda_э$ оказывается равным 2,5, для косинусного 1,6, что в обоих случаях существенно превышает $\lambda_с$.

Наибольшее значение имеет определение такого расположения светильников, при котором минимальны годовые расходы на эксплуатацию установки.

Стоимость светильников и их обслуживания с увеличением мощности лампы возрастает медленнее, чем мощность, и когда при увеличении λ сверх $\lambda_э$ мощность начинает возрастать, годовые расходы некоторое время еще продолжают уменьшаться, в результате чего всегда, в принципе, $\lambda_о > \lambda_э$, т. е. экономически наивыгоднейшее расстояние между светильниками больше энергетически наивыгоднейшего. В общем виде этот вопрос не поддается анализу, так как на значение $\lambda_о$ влияет много дополнительных факторов: освещенность и высота установки светильников, их конструктивная сложность, годовое число часов использования освещения, тариф на электроэнергию и т. д. В некоторых конкретных случаях значение $\lambda_о$ определяется путем индивидуальных расчетов.

Уже имеющийся опыт таких расчетов показывает, что соотношение $\lambda_о$ и $\lambda_э$ (или $\lambda_с$) в наибольшей степени зависит от произведения нормированной освещенности на квадрат расчетной высоты: Eh^2. С возрастанием этого произведения повышается удельный вес оплаты энергии в годовых расходах и значения $\lambda_о$ и $\lambda_э$ сближаются, иногда до почти полного совпадения. В этих случаях, что важно подчеркнуть, отношение наибольшей освещенности к наименьшей не превышает 3. Напротив, при малом значении произведения Eh^2 величина $\lambda_о$ значительно (до 1,5 раз) превышает величину $\lambda_э$, степень же неравномерности освещенности может достигать 10 и более.

Все приведенные ранее выводы основаны на рассмотрении изолированного поля, центральная точка которого освещается четырьмя светильниками. Но в больших помещениях может быть множество таких полей, причем центр каждого, кроме «своих» четырех светильников, освещается и всеми остальными.

Пусть увеличивается высота установки светильников, расположенных на неизменном расстоянии. Когда четыре ближайших светильника оказываются на наивыгоднейшей высоте, для остальных светильников высота будет еще меньше наивыгоднейшей и при дальнейшем увеличении высоты освещенность будет еще несколько увеличиваться. Аналогично в условиях изменения значения L, когда это значение, уменьшаясь, становится меньше светотехнически наивыгоднейшего, экономичность $Э_с$ может продолжать повышаться за счет удаленных светильников. Поскольку светотехническая экономичность (в том понимании, которое ей придается при рассмотрении вопросов размещения светильников) зависит только от равномерности освещенности, она достигает максимума в тот момент, как только с уменьшением λ создастся полная равномерность.

Эти и некоторые другие обстоятельства искажают ранее сделанные выводы, но имеют скорее принципиальное, чем практическое значение. Анализ показывает, что учет удаленных светильников не сильно изменяет значение $\lambda_с$ (а тем более $\lambda_о$ и $\lambda_э$) и что при ранее определенных значениях λ функции $Э$ если и не достигают действительного максимума, то достаточно приближаются к нему.

Дополнительно надо остановиться на роли высоты h при ее свободном выборе, тем более, что, основываясь на известной формулировке «освещенность обратно пропорциональна квадрату высоты», верной в действительности только для точек, лежащих на одном луче, многие эту роль переоценивают.

Когда светильники локализованного освещения расположены над определенными рабочими местами, роль высоты действительно значительна, при общем же равномерном освещении она сравнительно невелика и тем меньше, чем больше площадь помещения. Для подтверждения этого рассмотрим теоретический случай, когда площадь неограниченного размера освещается множеством светильников, высота которых возрастает при сохранении значения λ неизменным.

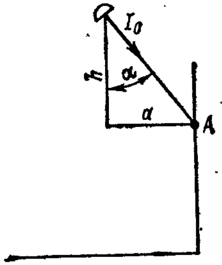

Рис. 2-7. Освещение вертикальной поверхности

Неизменность λ ведет к тому, что при одновременном изменении значений h и L направления от каждого из светильников на центральную точку поля сохраняются и освещенность от каждого светильника (а следовательно, и от всех светильников) уменьшается обратно пропорционально h^2. Следовательно, в том же отношении должен увеличиваться световой поток каждого светильника для сохранения освещенности неизменной. Но так как число светильников уменьшается также пропорционально h^2, то общий потребный поток остается неизменным; если же освещение выполняется лампами накаливания, то с увеличением значений h и L будем переходить к лампам большей мощности, т. е. со все большей световой отдачей, и суммарная мощность освещения будет уменьшаться, пока мощность лампы не достигнет предельно возможного значения.

Дополнительно рассмотрим практически важный случай освещения вертикальной поверхности светильником, подвешенным на высоте h над уровнем, на котором нормирована освещенность. Требуется выбрать оптимальное значение размера a (рис. 2-7).

В этом случае

$$E = \frac{I_0 \cos^{m+3}\alpha\, \mathrm{tg}\,\alpha}{h^2}$$

и дифференцирование этого выражения по α приводит к результату:

$$a = h : \sqrt{m + 2}.$$

В подобных случаях нередко светильники наклоняются так, чтобы осевая сила света была направлена в освещаемую точку A. Это эквивалентно

установке светильников, для которых $m = 0$, и из выражения (2-6) получаем:

$$a = h : 2; \quad \alpha = 35°.$$

Если поверхность освещается целым рядом светильников, параллельным этой поверхности, при расстоянии между светильниками L, то несколько более сложный вывод приводит к результату:

$$a = \sqrt{\frac{h^2 + L^2}{m + 2}}.$$

Поучительно, что рассмотренная задача, как и некоторые другие задачи в светотехнике, может быть решена «методом поворота». Повернув рисунок на 90° по часовой стрелке сделаем вертикальную поверхность горизонтальной, причем a будет играть роль h, а h — роль a. Из ранее рассмотренного определения наивыгоднейшей высоты ясно, что при установке одного светильника и $m = 0$ значение $a = h : \sqrt{2}$.

Все приведенные выше выводы из теории наивыгоднейшего расположения светильников используются в практике с некоторыми оговорками, и найденные значения L в основном служат лишь для ориентировки при выборе размещения светильников. Для этого есть несколько причин.

Все кривые зависимости $Э = f(\lambda)$ вблизи максимума весьма пологи, и отклонение величины λ от оптимального значения в пределах примерно $\pm 30\%$ обычно допустимо. Определяющим фактором при практическом выборе значения L часто оказывается ограниченность сортамента ламп. В высоких помещениях может оказаться оптимальным очень небольшое значение L, но если при этом для создания заданной освещенности необходимы, например, лампы накаливания мощностью по 5 кВт, то волей-неволей придется уменьшать L. Правда, в производственных помещениях взамен этого часто применяется установка светильников блоками, суммарный поток каждого из которых соответствует расчетному, а при использовании люминесцентных ламп применяются сдвоенные или строенные ряды светильников. Далее, определенные ограничения на размещение светильников накладывает конструкция перекрытия, т. е. наличие ферм, балок или кессонов. Наконец, уже и сама необходимость разместить в пределах определенной длины целое число светильников уже вызывает корректировку значения L.

Пусть, например, длина помещения 12 м и теоретически определено, что $L = 5$ м. Установив на таком расстоянии два светильника, мы приходим к непомерно большим значениям l; переходя же к трем светильникам, видим, что они удачно размещаются, если принять $L = 4{,}5$ м и $l = 1{,}5$ м.

В некоторых случаях при решении подобных задач может помочь «правило третей». Пусть вдоль стороны помещения длиной A надо разместить светильники при желательном расстоянии L и при $l = \frac{1}{3} L$.

Сначала прикидываем возможное число светильников: $n < A : L$, округляем его до целого числа и находим уточненное расстояние между светильниками:

$$L = \frac{A}{n - 1/3}.$$

Исходным значением L при выборе расположения светильников, как правило, должно приниматься соответствующее значение $\lambda_э$ при лампах накаливания и λ_c — в остальных случаях. Значение λ_0 практически для внутреннего освещения определяется лишь в редких случаях и обязательно сопровождается проверкой качества освещения и возможности его осуществления стандартными лампами.

При локализованном освещении основное значение при выборе расположения светильников имеют вопросы распределения освещенности по поверхностям и направления света. Общих указаний дать, конечно, невозможно. Отметим только, что при возможности возникновения отраженной блескости предпочтительным является боковое или заднебоковое направление света, при работах, выполняемых правой рукой, направление света преимущественно слева. В пределах группы светильников локализованного освещения, решающих общую светотехническую задачу, сохраняют силу сделанные выше выводы в отношении выбора расстояния между светильниками и высоты их установки.

ПРАКТИКА РАЗМЕЩЕНИЯ СВЕТИЛЬНИКОВ С УЧЕТОМ ДОСТУПА К НИМ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Возможные места установки светильников схематически показаны на разрезе здания (рис. 2-8), применительно к которому ниже приводятся нормативные требования и указывается область применения.

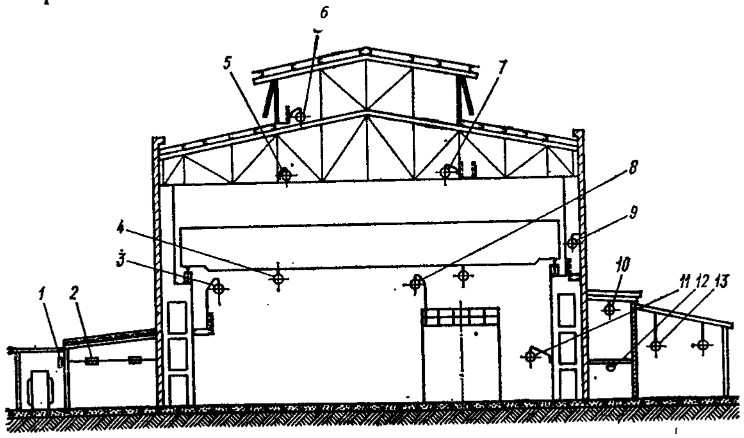

Рис. 2-8. Возможные места установки светильников

В помещениях ограниченной высоты светильники устанавливаются либо на свесах (*13*), либо непосредственно на потолке (*12*) и обслуживаются с лестниц или стремянок, причем применение тех или других разрешается при высоте подвеса $h_п$ не более 5 м

(здесь и дальше высота указывается до нижней точки светильника). Эти светильники не должны устанавливаться непосредственно над оборудованием, лентами транспортеров и т. д., т. е. над теми местами, где нельзя установить стремянку. В помещениях, где имеются открытые токоведущие части, соприкосновение с которыми или падение человека на которые может быть опасным, значение $h_п$ ограничивается значением 2,1 м — *1*.

В помещениях с подшивными или подвесными потолками над последними размещается или технический этаж, в котором могут находиться люди, или непроходная техническая полость. В первом случае применяются встроенные светильники верхнего обслуживания *2*, во втором, наравне со встроенными светильниками нижнего обслуживания, могут применяться подвесные или потолочные светильники.

Для светильников *10* верхних технологических площадок рекомендуется значение $h_п$ не более 3,5 м, чтобы избежать необходимости втаскивания на эти площадки тяжелых стремянок. Для таких же площадок, но открытых со стороны цеха и имеющих ограждение, иногда практикуется установка светильников *3* на стойках — «гусаках», причем бывает целесообразным использовать эти светильники и для освещения нижних отметок цеха. Высота установки этих светильников не превышает 2,5 м. Подобные же светильники (*8*) могут устанавливаться на огражденных площадках технологического оборудования.

Очень широко применяется установка светильников *11* на стенах на кронштейнах при $h_п \leqslant 5$ м. В ряде случаев они предназначаются для увеличения вертикальной освещенности на оборудовании; в суженных местах и проходах они позволяют осветить пол или оборудование с относительно малой высоты, в отдельных же случаях (см. ниже) они полностью заменяют собой верхнее освещение. Эти светильники, так же как светильники *7* и *8*, нередко устанавливаются с наклоном в сторону освещаемых поверхностей или же выбираются одностороннего светораспределения.

В помещениях с ферменным покрытием чаще всего основную роль играют светильники *5* верхнего освещения, установленные на фермах. При возможности они обслуживаются с мостовых кранов, причем нормы требуют, чтобы они были размещены не ниже 1,8 м над настилом моста крана или же заподлицо с нижним поясом ферм.

С точки зрения обслуживания оптимальным решением является установка светильников *7* вдоль светотехнических мостиков. Они должны быть установлены на уровне настила мостиков с отклонением ±0,5 м, так как при установке на стойках от мостиков падала бы тень на пол.

Иногда для установки светильников *6* удается использовать площадки, предназначенные для обслуживания фрамуг фонарей естественного освещения. В относительно редких случаях для

светильников *9* предусматриваются специальные локальные площадки с обеспеченным доступом (лестницы, трапы), где преимущественно размещаются сосредоточенные группы наклонных светильников. Наконец, почти всегда обязательна установка светильников *4* под мостом крана для компенсации производимого последним затенения и для увеличения освещенности в зоне работы крана.

Остается сложной и не вполне еще решенной проблема освещения некоторых помещений большой высоты. Обслуживание с мостовых кранов практически обеспечивается, только если работа на них имеет монтажный или ремонтный характер, краны же, непосредственно обслуживающие технологический процесс, настолько заняты, что их трудно выделить для монтера-светотехника (кроме цехов, работающих в 1—2 смены). Разного рода кран-балки непосредственно не могут быть использованы для обслуживания светильников, но они иногда приспосабливаются для этой цели путем устройства специальных площадок или монтерских корзин, подвесные же кран-балки подчас столь приближены к потолку, что даже установка светильников над ними невозможна.

В принципе не исключено применение светильников, индивидуально опускаемых с помощью лебедки или устанавливаемых вдоль троса и опускаемых вместе с последним. Это громоздкое и сложное решение не получило широкого применения в промышленности и используется только в общественных зданиях для многоламповых люстр.

Возможным решением вопроса является обслуживание светильников с напольных приспособлений, самоходных или несамоходных, несущих монтерскую корзину, укрепленную на телескопической стойке или на поворотной стреле. Это решение широко применяется для наружного освещения, а также в непроизводственных сооружениях средней высоты, например на станциях метрополитена. Использование его на промышленных предприятиях ограничивается недостаточным сортаментом выпускаемых напольных устройств и в еще большей степени такой планировкой оборудования и такой загроможденностью пола в цехах, которая исключает возможность перемещения этих устройств. Кроме того, многие современные цехи имеют высоту 12—40 м, при которой вообще применение напольных устройств недопустимо.

При стечении неблагоприятных обстоятельств выход приходится искать в трех направлениях: замена верхнего освещения двумя рядами светильников, установленных на кронштейнах вдоль продольных стен или на колоннах, установка светильников на уже имеющихся или специально предусмотренных площадках, устройство светотехнических мостиков.

Хотя эксплуатационный персонал предприятий нередко высказывается в пользу первого из этих решений, оно целесообразно лишь в редких случаях. Подтвердим это расчетом. Пусть ширина помещения B, и два боковых ряда светильников установлены на наибольшей высоте, при которой возможно обслуживание с лестниц, т. е. 5 м. Пусть, далее, светильники при всех значениях B наклонены так, что их оси направлены на продольную ось помещения. Тогда из выражения (2-1) при $m = 0$ можно видеть, что высота 5 м будет наивыгоднейшей при $B = 14$ м. При большей ширине цеха удовлетворительно осветить всю его площадь, не прибегая к верхнему освещению, затруднительно; кроме того, при любой ширине вариант бокового освещения возможен только при отсутствии крупного затеняющего оборудования.

Возможность использования существующих площадок имеется далеко не всегда. Устройство специальных площадок является, можно сказать, решением на самый крайний случай.

Оптимальным решением, при отсутствии иных возможностей, является устройство светотехнических мостиков, опыт применения которых полностью себя оправдал. Более того, даже при возможности использования для доступа к светильникам крупных мостовых кранов устройство мостиков может оказаться экономически предпочтительным. К сожалению, в данное время устройство мостиков разрешается только по согласованию с вышестоящими организациями.

Число продольных рядов мостиков следует строго ограничивать, и, как правило, в пролетах шириной до 24 м должно быть не более двух, а в пролетах большей ширины — трех рядов мостиков.

2-6. ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СВЕТИЛЬНИКОВ

Как условия применения светильников, так и предъявляемые к ним требования столь разнообразны, что выбор светильников необходимо основывать на знании целого ряда их характеристик, как светотехнических, так и конструктивных.

Осуществляемое светильниками перераспределение светового потока ламп неизбежно связано с частичными потерями светового потока, и важной (хотя не решающей) характеристикой светильников является их коэффициент полезного действия, т. е. отношение потока светильника к потоку установленной в нем лампы.

Световой поток светильника Ф может быть различно распределен между верхней ($Ф_{\bigtriangleup}$) и нижней ($Ф_{\bigtriangledown}$) полусферами. По ГОСТ 13828—74, если $Ф_{\bigtriangledown} > 80\%Ф$, светильники относятся к классу прямого света (П), при $Ф_{\bigtriangledown} > 60 \div 80\%$ Ф — к классу преимущественно прямого света (Н), при $Ф_{\bigtriangledown} = 40 \div 60\%Ф$ — к классу рассеянного света (Р), при $Ф_{\bigtriangleup} = 60 \div 80\%Ф$ — к классу преимущественно отраженного света (В) и при $Ф_{\bigtriangleup} > 80\%Ф$ — к классу отраженного света (О).

Излучаемый в данной полусфере поток может быть различно распределен в пространстве. Его распределение по отдельным направлениям пространства характеризуется кривыми силы света, причем особое значение имеют эти кривые для нижней полусферы. Направление силы света в пространстве задается меридиональным углом α и азимутом β (рис. 2-9). Если для всех меридиональных плоскостей светораспределение одинаково, то оно называется круглосимметричным и определяется одной меридиональной кривой. Во многих случаях, например у большинства светильников с горизонтально расположенными трубчатыми лампами, светораспределение имеет две плоскости симметрии и характеризуется продольной и поперечной (по отношению к осям ламп) кривыми силы света. В общем случае, т. е. при несимметричном светораспределении, последнее характеризуется кривыми силы света в нескольких меридиональных плоскостях.

ГОСТ 13828—74 устанавливает следующие основные типы кривых силы света (в любой полусфере): К — концентрированная, Г — глубокая, Д — косинусная, Л — полуширокая, М — равномерная, Ш — широкая, С — синусная (рис. 2-10). Возможны также некоторые другие формы кривых силы света, не отраженные в ГОСТ и именуемые специальными. При несимметичном светораспределении светильники могут иметь, например, в одной из меридиональных плоскостей светораспределение Ш, а в перпендикулярной ей плоскости — светораспределение Д. В некоторых случаях, как указано в § 1-1, закон изменения силы света в функции угла α может быть выражен уравнением.

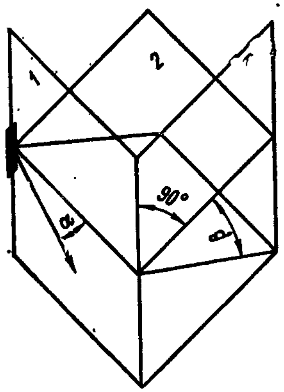

Рис. 2-9. Плоскости и углы, для которых даются значения силы света

1 — продольная плоскость; 2 — поперечная плоскость; α — меридиональный угол; β — азимут

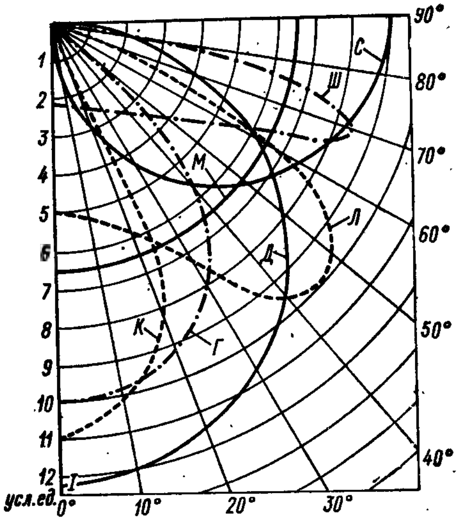

Рис. 2-10. Типовые кривые силы света

Необходимо пояснить, что кривые светораспределения конкретных выпускаемых заводами светильников могут несколько отличаться от типовых кривых, приведенных на рис. 2-10, но характер их должен соответствовать типовым кривым.

Представление кривых силы света в виде графиков, построенных в полярных координатах, наиболее наглядно, но для практических расчетов чаще пользуются таблицами значений силы света для различных значений α. Для сопоставимости данных как кривые, так и таблицы силы света обычно даются для светильника с условным световым потоком лампы (или суммарным потоком нескольких ламп) 1000 лм.

Блескость светильников характеризуется их яркостью, причем может указываться как габаритная яркость, т. е. отношение силы света к площади проекции светильника на плоскость, так и максимальная яркость. Большое значение для ограничения ослепленности, создаваемой светильниками, имеет защитный угол ρ (рис. 2-11), создаваемый отражателем, а в светильниках с люминесцентными лампами — также планками экранирующей решетки.

ГОСТ 13828—74 и 14254—69 классифицируют светильники также по степени защиты от пыли и воды.

Обозначение степени защиты состоит из двух прописных букв латинского алфавита — IP (начальные буквы английских слов International Protection) и двух цифр, первая из которых обозначает степень защиты от пыли, вторая — от воды (например, IP54). Для светильников, имеющих некоторые конструктивные особенности, обозначение степени защиты не имеет букв IP, а у первой цифры, указывающей степень защиты от пыли, добавляется «штрих» (например, 5′4).

По степени защиты от пыли различаются светильники открытые (2), перекрытые с неуплотненной светопроницаемой оболочкой (2′), пылезащищенные, т. е. допускающие проникновение пыли в полость светильника только в безвредных количествах (5),

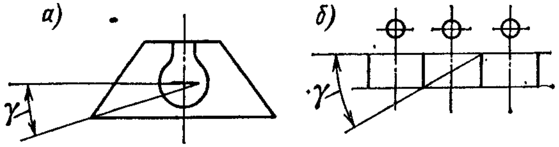

Рис. 2-11. Защитный угол, создаваемый отражателем *а* и экранирующей решеткой *б*

с ограниченной зоной пылезащиты только в пределах расположения контактных частей (5′), пыленепроницаемые (6) и с ограниченной зоной пыленепроницаемости (6′).

По степени защиты от воды различаются светильники незащищенные (0), каплезащищенные (2), дождезащищенные (3), брызгозащищенные (4), струезащищенные (5) и некоторые другие.

Об исполнениях светильников для взрывоопасных помещений см. в § 7-2.

Классификация светильников по климатическому исполнению дана в ГОСТ 15150—69. В частности, светильники для умеренного климата обозначаются буквой У, для тропиков — Т и т. д. Предусмотренные тем же ГОСТ категории размещения при выборе светильников особого значения не имеют, так как к одной и той же категории относятся помещения с несопоставимо разными условиями среды.

Выпускаемые промышленностью светильники могут иметь собственное наименование («Астра»), обозначаться номером артикула (арт. 135) или маркироваться аббревиатурой (ПВЛ — пыле- и водозащищенный люминесцентный), но во всех случаях им должно присваиваться определенным образом построенное обозначение в соответствии с ГОСТ 13828—74, которое поясняется на следующем примере:

ЛСП06-2×40-013-У4.

Здесь Л — люминесцентные лампы (Н — обычные лампы накаливания, И — галогенные лампы КГ, Р — лампы ДРЛ, Г — лампы ДРИ, Ж — натриевые лампы, К — ксеноновые лампы);

С — подвесной светильник (П — потолочный, Б — настенный, В — встраиваемый, Н — настольный, Т — напольный, К — консольный и т. д.); П — светильник для промышленных предприятий (Р — для рудников и шахт, О — для общественных зданий, У — для наружного освещения и т. д.); 06 — номер серии; 2×40 — число и мощность ламп (цифра 1 не указывается); 013 — номер модификации; У4 — климатическое исполнение и категория размещения (ГОСТ 15150—69).

2-7. ВЫБОР СВЕТИЛЬНИКОВ ПО СВЕТОТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Из характеристик, определяющих качество освещения, от типа светильника зависит степень прямой и отраженной блескости, равномерность освещения, распределение освещенности по поверхностям помещения, соотношение горизонтальной и вертикальной освещенности, степень смягчения теней.

Ограничение прямой блескости достигается применением светильников с достаточным защитным углом, а при необходимости — с рассеивателями. Помимо прямых нормативных требований, должно обращаться внимание на индивидуальные особенности освещаемого объекта. Так, если по ходу работы оси зрения могут быть направлены вверх, то необходимы более эффективные меры для ограничения блескости, чем это требуется нормами; наоборот, если по местным условиям попадание светильников в поле зрения работающих исключается, то при целесообразности для «острой» подсветки отдельных поверхностей могут использоваться даже прожекторы, обычно не рекомендуемые для внутреннего освещения.

Основными способами ограничения отраженной блескости являются выбор направления света и уменьшение яркости светильников путем снабжения их рассеивателями или даже выполнения их в виде больших светящих поверхностей. Отмечается, что определенные преимущества имеют светильники с кривыми типа Л, обеспечивающими преимущественно боковое направление света на рабочие места, при котором направление наибольшей яркости поверхностей не совпадает с направлением осей зрения.

При общем освещении большим числом светильников неравномерность освещения не является проблемным вопросом: самый факт нормирования наименьшей на освещаемой площади освещенности вынуждает устанавливать светильники на таком расстоянии друг от друга, что необходимая степень равномерности обеспечивается.

Для наглядного сопоставления распределения освещенности при различных типовых кривых приводится рис. 2-12, на котором значения освещенности рассчитаны при одинаковом для всех светильников световом потоке нижней полусферы.

При освещении поверхности одним светильником наибольшая равномерность горизонтальной освещенности обеспечивается при кривых типов Л и Ш. Полная равномерность освещенности может быть достигнута, если сила света подчиняется уравнению

$$I_\alpha = \frac{K}{\cos^3 \alpha},$$

где K — постоянная величина. Форма такой кривой приведена на рис. 2-13.

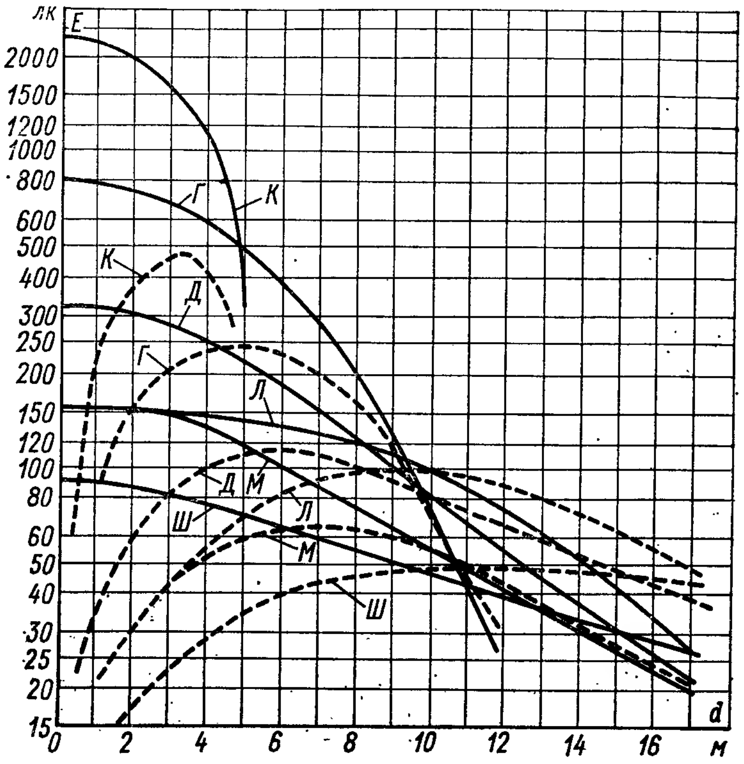

Рис. 2-12. Характер распределения освещенности при различных формах кривых силы света:

——— — горизонтальная; — — — — вертикальная в плоскости, перпендикулярной проекции луча на горизонтальную плоскость; буквы у кривых — обозначение кривых сил света по рис. 2-10

Равномерное освещение по всей высоте вертикальной поверхности может быть достигнуто при той же, по существу, кривой силы света, но повернутой на 90°. Обе эти кривые технически осуществимы в пределах определенных углов α.

Подобного рода кривые в действительности используются в установках наружного освещения, где особенно важно увеличение расстояния между светильниками, при освещении же больших горизонтальных поверхностей внутри зданий они почти не находят применения. Во-первых, в этом случае на каждый светильник приходится очень большая площадь, и, умножив ее на относительно высокие значения освещенности, требуемые для внутреннего освещения, получаем столь большое значение необходимого светового потока, какого не имеет ни одна стандартная лампа. Во-вторых, в этом случае весьма неблагоприятно распределяется

вертикальная освещенность: она будет близка к нулю в точках около проекции светильника и резко возрастать по мере удаления от него. Кроме того, при таком варианте освещения будут создаваться густые, не перекрываемые другими светильниками тени.

Во многих случаях, хотя превалирующее значение имеет освещенность горизонтальных рабочих поверхностей или пола, требуется также осветить поверхности оборудования, расположенные на достаточной высоте от пола, иногда даже выше точки установки светильника: складские стеллажи, трубопроводы и т. п. В подобных случаях часто приходится выбирать светильники с типовыми кривыми М. Хотя в большинстве случаев расчет освещения ведется на горизонтальную освещенность, но почти всегда имеет значение также освещенность вертикальных поверхностей. В этом отношении типовые кривые Г и, особенно, К, оказываются наименее удовлетворительными: в точках под светильником вертикальная освещенность близка к нулю из-за большого угла падения света, в более удаленных точках она мала из-за небольших значений силы света в направлении этих точек. В силу этих причин, а также в силу того, что концентрированные кривые силы света больше других искажаются при запылении, применение этих кривых следует ограничивать случаями крайней необходимости.

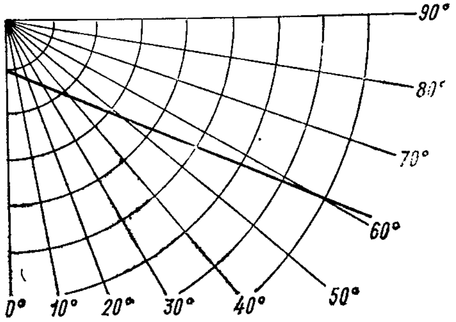

Рис. 2-13. Кривая силы света, дающая одинаковую во всех точках освещенность

Не меньшее значение, чем выбор типа кривой силы света, имеет выбор класса светораспределения. С увеличением доли потока, направляемого светильником в верхнюю полусферу, смягчаются, а затем почти исчезают тени, уменьшается блескость, как прямая, так и отраженная (последняя в некоторых случаях заменяется вуалирующей световой дымкой), улучшаются условия освещения различно ориентированных в пространстве поверхностей. Существенным является также общее улучшение вида помещения, когда стены и потолки имеют достаточную яркость. В сфере качества освещения всему этому противостоит только одно отрицательное обстоятельство: ухудшение видимости и пространственного восприятия рельефных поверхностей из-за смягчения собственных теней. Этот недостаток не следует, однако, переоценивать. Значительно важнее то, что с увеличением доли потока в верхней полусфере почти всегда возрастает потребная мощность установки.

С учетом сказанного в производственных помещениях с незапыленными, хорошо отражающими стенами и потолками реко-

мендуется применение светильников класса Н. Нормы для общественных зданий требуют, чтобы в помещениях этих зданий, предназначенных для работы, светильники, как правило, не менее 15% своего потока направляли в верхнюю полусферу. Остальные классы светильников, т. е. Р, В, О, применяются сравнительно редко, чаще всего в силу архитектурно-эстетических соображений, а классы В и О — кроме того, при высоких требованиях к качеству освещения и невозможности выполнить их другим путем.

Распределение яркости по поверхностям верхней зоны помещения и контраст между поверхностями светильников и потолком сильно зависит от уровня освещенности и коэффициентов отражения поверхностей нижней зоны, особенно пола.

При установке в помещении, например, одного потолочного светильника прямого света потолок за счет многократных отражений получит какую-то яркость L. Если повысить освещенность в 10 раз и установить вместо одного 10 светильников, то и яркость потолка составит $10L$, в то время как яркость светильников не изменится.

Таким образом, при высоких освещенностях и светлых полах создаются предпосылки для преимущественного применения светильников класса П даже в помещениях общественных зданий.

2-8. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОБОСНОВАННОСТЬ ВЫБОРА ТИПА СВЕТИЛЬНИКА

В общих случаях наиболее целесообразный тип светильника должен выбираться на основе полного технико-экономического сопоставления различных возможных вариантов (§ 8-4). Так поступать обязательно при выработке типовых вариантов освещения часто повторяющихся объектов и желательно во всех наиболее ответственных случаях.

При сопоставлении вариантов основными изменяющимися составляющими затрат будут стоимость электроэнергии, амортизационные отчисления от стоимости светильников и затраты на обслуживание последних. Стоимость электроэнергии обычно преобладает в общей сумме затрат, к тому же остальные слагаемые не всегда бывают точно известны, и в практике чаще всего сопоставление светильников производится только по энергетическому показателю — удельной установленной мощности. Этот показатель легко определяется в процессе расчета.

При расчете по точечному методу (§ 3-4) надо избегать распространенной ошибки: учета в центре поля освещенности только от ближайших светильников. В этом случае результаты будут тенденциозно благоприятны в сторону светильников с более концентрированным светораспределением, так как у их «конкурентов» значительная доля освещенности создается именно удаленными светильниками.

Экономически наиболее целесообразно использовать светильники данного типа при наибольшей возможной для них мощности лампы и при наивыгоднейшем значении $\lambda = L : h$. Наоборот, светильники становятся явно нецелесообразными, если при наименьшей возможной мощности лампы и при том же значении λ освещенность превышает заданную и для получения последней приходится увеличивать λ, ухудшая энергетические показатели установки. К области применения светильника можно подойти следующим образом.

Основная формула, служащая для определения необходимого потока лампы (в люменах) в светильнике, при расчете по методу коэффициента использования (§ 3-2) имеет вид

$$\Phi = \frac{EkSz}{N\eta},$$

где E — освещенность, лк; k — коэффициент запаса; S — площадь помещения, м^2; z — отношение средней освещенности к минимальной; N — число светильников; η — коэффициент использования светового потока.

Преобразуем эту формулу, приняв $\Phi = CP$ (где C — световая отдача лампы, лм/Вт; P — мощность лампы, Вт) и учтя, что в больших помещениях со многими полями с достаточной точностью можно считать $S = \lambda^2 h^2 N$.

Тогда

$$\Phi = CP = \frac{Ekh^2\lambda^2 z}{\eta}$$

и

$$P = Ekh^2\frac{\lambda^2}{\eta c}. \qquad (2\text{-}6)$$

Отсюда видно, что основной аргумент, определяющий потребную мощность лампы, есть Ekh^2.

Применим формулу (2-6) для светильника УПД ДРЛ, пригодного для ламп мощностью от 250 Вт (Φ = 11 000 лм) до 700 Вт (Φ = 35 000 лм), считая $\lambda = 1{,}4$.

Коэффициент использования зависит от ряда факторов (см. § 3-2), но поскольку мы ищем лишь порядок величины для помещений большой площади, примем среднее значение $\eta = 0{,}5$. Подставляя это значение в выражение (2-6), находим, что для лампы 700 Вт Ekh^2 = 8900 лм и для лампы 250 Вт — 2800 лм. Пусть, например, задано E = 200 лк и $k = 1{,}5$. Легко подсчитать, что мощность лампы достигнет 700 Вт при h = 5,5 м и уменьшится до 250 Вт при h = 3 м. Между этими граничными значениями есть, однако, существенная разница.

Если $Ekh^2 > 8900$ лм, то лампы 700 Вт могут быть расположены с уменьшенным значением λ или же в вершинах полей может быть установлено по 2—3 светильника. В этом нет ничего плохого, хотя это указывает на предпочтительность применения более мощного светильника.

Другое дело — нижний предел. Он достаточно жестко ограничивает применение светильника при малых Ekh^2, так как пришлось бы сильно увеличивать значение λ, ухудшая светотехнические и энергетические показатели установки.

Учитывая, что удельная мощность осветительной установки

$$w = \frac{NP}{S},$$

из формулы (2-6) можем получить выражение

$$w = \frac{Ekz}{\eta C}$$

или, относя эту величину к единичной освещенности и характеризуя энергетическую экономичность величиной, обратной удельной мощности,

$$Э_э = \frac{\eta C}{z}. \qquad (2\text{-}7)$$

На этом последнем выражении необходимо остановиться особо. Основным фактором, определяющим экономичность светильника, является коэффициент η, который при заданных условиях зависит от к. п. д. светильника и, в наибольшей степени, от формы его кривой силы света.

При прочих равных условиях типовые кривые силы света светильников класса П располагаются в порядке убывания значений η так: К—Г—Д—Л—М—Ш—С. Разница особенно сказывается при малых индексах помещения, т. е. в основном в помещениях большой высоты, что заставляет выбирать для высоких помещений кривые Г и Д, а в отдельных случаях, с учетом сделанных выше замечаний, — К. В низких помещениях разница в значениях коэффициентов использования относительно невелика.

Увеличению коэффициента η в направлении от кривых С и Ш к кривым К и Г противостоит уменьшение значения λ, во всех случаях ведущее к удорожанию установки, а при использовании ламп, световая отдача которых возрастает с увеличением мощности, также уменьшение С и, следовательно, рост удельной мощности.

Скорее принципиальное, чем практическое, значение имеет наличие в знаменателе формулы (2-7) коэффициента z, зависящего от многих факторов и никогда не известного с достаточной точностью. Это одна из причин, в силу которых в разное время решались задачи выбора при заданном значении λ оптимальной формы кривой силы света, т. е. такой формы, при которой z минимально. В какой-то степени результаты подобных работ учитывались при построении светильников, но решающего значения это не имело. При соответствующем уменьшении λ можно получить вполне равномерное освещение ($z = 1$) едва ли не при любой кривой силы света, наоборот, при теоретически идеальной кривой даже незначительное изменение λ может вызвать большую неравномерность.

Из всего вышесказанного ясно, что следует говорить не о светильниках, более или менее экономичных вообще, а о светильниках, предпочтительных в данных конкретных условиях.

Только для определенных, неизменных, условий, в частности для помещений неограниченной площади и при использовании ламп, световая отдача которых зависит от мощности, целесообразно строить кривые $Э_э = f(Ekh^2)$, дающие суждения о предпочтительности того или иного светильника при различных Ekh^2.

2-9. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СВЕТИЛЬНИКОВ

От конструктивного исполнения светильников зависит их надежность и долговечность в данных условиях среды, безопасность в отношении пожара, взрыва и поражения электрическим током, а также удобство обслуживания.

Следует подчеркнуть разницу между характером требований к исполнению светильников в различных условиях среды. В пожаро- и взрывоопасных зонах неправильно выбранные светильники могут привести к столь тяжелым и даже трагическим последствиям, что требования к их исполнению являются, безусловно, обязательными и никаких послаблений не должно допускаться. Эти требования особо рассмотрены в § 7-2.

Указанное в каталогах исполнение светильников принимается как документальный факт и отдельным лицам не дается права решать, является ли данный светильник, например, пылезащищенным или пыленепроницаемым. Наоборот, область применения светильников в каталогах не всегда указывается точно и часто в практике может расширяться, но, конечно, в пределах разрешенной нормами области применения данного исполнения.

Для помещений с неблагоприятными, или, как обычно говорят, с тяжелыми условиями среды (но не пожаро- или взрывоопасных), при выборе исполнения светильников допускается известная степень свободы. Например, категория «пыльных помещений» охватывает широкую группу объектов с весьма различными условиями среды, и в индивидуальном порядке возможно решить, применять ли сложные в обслуживании пыленепроницаемые светильники или более запыляемые, но легче очищаемые, открытые.

Приводя основные рекомендации по выбору светильников для помещений с тяжелыми условиями среды, надо также учитывать, что классификационная оценка светильников по всем действующим стандартам далеко не полностью характеризует пригодность их в тех или иных условиях и что, хотя степени защиты от воды и от пыли указываются отдельно, фактически они находятся в тесной связи между собою.

В помещениях сырых, особосырых, с химически активной средой, а также при установке вне зданий степень защиты светильников должна быть, как правило, не ниже IP53 или 5'3, причем предпочтительны степени защиты IP54 или 5'4 (см. § 2-6). Из числа конструкционных и светотехнических материалов наиболее устойчивы к воздействиям среды фарфор, силикатное стекло и пластические массы; далее следуют поверхности, покрытые силикатной эмалью, и органическое стекло, затем — алюминий, который малоустойчив к воздействию щелочей, и, наконец, черные металлы. Особенно уязвимым местом светильников в тяжелых условиях среды является место ввода сетевых проводников. Чаще всего у светильников, предназначенных для этих условий, ввод производится через уплотняющий сальник, но еще более надежным является раздельный ввод проводников через изолирующие полости, трубки или втулки.

В помещениях, где осуществляется гидроудаление пыли, степень защиты должна быть не ниже IP55 или 5'5, при отсутствии же таких светильников могут применяться светильники с люминесцентными лампами со степенью защиты 5'X или 6'X *. В жарких помещениях могут применяться любые светильники, но, по возможности, следует избегать применения светильников с закры-

* Знак X в обозначении требуемой или рекомендуемой степени защиты светильников от воды показывает, что к этому виду защиты специальных требований не предъявляется. В отдельных случаях, при необходимости такой защиты, знаком X также может обозначаться, что ее степень определяется конкретными условиями в местах установки светильников.

тыми стеклянными колпаками, из числа же люминесцентных ламп — использовать амальгамные.

В пыльных помещениях вопрос выбора светильников решается индивидуально, лучше всего — на основе опыта эксплуатации того или иного светильника в аналогичных условиях. В принципе предпочтительны степени защиты IP5X и IP6X, но, поскольку обслуживание светильников без стеклянного колпака проще, здесь могут быть допущены также степени защиты 5′X и 6′X, а при наличии пыли, непроводящей электрический ток, — даже IP2X. Не рекомендуется применение светильников с неуплотненными стеклянным колпаками (2′X) или экранирующими решетками.

Большое значение имеет применение в пыльных помещениях ламп-светильников, т. е., в частности, зеркальных ламп накаливания и газоразрядных ламп с отражателем. В этом случае защита от пыли поверхностей, участвующих в перераспределении светового потока осуществляется в самих лампах, но надо позаботиться о защите от пыли и других возможных воздействий контактных частей, в связи с чем лампы-светильники рекомендуется устанавливать в арматуры исполнений 5′X или 6′X.

В отношении стабильности светотехнических характеристик в условиях пыльной среды наиболее надежны светильники исполнений IP5X или IP6X, у которых выходное отверстие перекрыто плоским или выпуклым защитным стеклом. На втором месте находятся светильники с замкнутым, уплотненным стеклянным колпаком без отражателя, на третьем — такие же светильники, но с отражателем. В этом случае стеклянный колпак защищает от пыли только лампу, но, в свою очередь, будучи запыленным, поглощает часть потока как на пути от лампы к отражателю, так и от отражателя во внешнее пространство. Из светильников, вообще не имеющих пылезащиты, предпочтительны светильники с естественной вентиляцией.

Эффективным средством пылезащиты является постоянная подача в полость светильника чистого воздуха под некоторым давлением. Подобные схемы были у нас испробованы, но не нашли широкого применения из-за некоторых практических и экономических соображений.

По степени восстанавливаемости светотехнических свойств после многократной очистки первое место занимают поверхности, покрытые силикатной эмалью, и стеклянные, в том числе зеркальные, поверхности; промежуточное положение занимают эмали, используемые в люминесцентных светильниках, и алюминиевые поверхности; очень плохо себя зарекомендовали различные суррогаты эмалей и краски.

Очевидно, что при выборе светильников для специфических климатических районов должно учитываться их климатическое исполнение.

Для практики важна не только устойчивость светильника к воздействиям среды, но и удобство его обслуживания, т. е.

в первую очередь способ соединения между собой частей, разъем которых необходим для доступа во внутреннюю полость светильника. С этой точки зрения наименее желательно применение светильников, для открывания которых необходимо отвинтить несколько гаек с помощью ключа. Даже только замена простых гаек «барашками» значительно улучшает дело, однако наиболее просты в обслуживании светильники (конечно, из числа закрытых), в которых соединение частей достигается пряжковыми запорами или винтовой нарезкой на самих этих частях, в частности на горловине стеклянного колпака.

Например, работники эксплуатации предпочитают светильнику повышенной надежности НЗБ, казалось бы, более сложный взрывонепроницаемый светильник ВЗГ, так как в первом для снятия колпака надо отвернуть несколько гаек, а во втором — нижнюю часть корпуса со стеклом вывернуть из верхней части.

Некоторые светильники имеют в своей конструкции контактное разъемное соединение. Такие светильники следует выбирать в случаях, когда предполагается снятие их для очистки, в частности при установке в труднодоступных местах. Однако для помещений с тяжелыми условиями среды такие светильники не рекомендуются ввиду недостаточной надежности контактных разъемных соединений в таких условиях. При выборе светильников приходится учитывать и некоторые другие детали их конструкции, такие, как способ крепления (на крюке, на трубе и т. д.), место ввода (осевой, боковой) и др.

2-10. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОРТАМЕНТА СВЕТИЛЬНИКОВ

Разнообразие типов и мощностей источников света, условий среды, а также светотехнических и конструктивных требований к светильникам определяют необходимость иметь в сортаменте большое число их типоразмеров, которое в настоящее время достигло примерно 1000.

Возрастанию этого числа способствует и выпуск светильников специализированного назначения, например для школ, больниц, улиц и т. д., хотя надо сказать, что в практике осуществления осветительных установок принцип специализации часто и обоснованно нарушается. Так, ранее выпускавшийся в громадном количестве «школьный» светильник ШОД получил широчайшее применение в различных общественных и производственных зданиях, а плафон артикула 135, он же ПСХ, когда-то предназначавшийся для освещения амбаров, в массовом порядке используется в низких помещениях промышленных предприятий, в ваннах жилых домов и даже в парадных помещениях общественных зданий в качестве сигнального фонаря у выходов.

Каждый типоразмер светильника с газоразрядными лампами и галогенными лампами накаливания типа КГ предназначается для ламп одной определенной мощности. Практически все светильники с люминесцентными лампами имеют встроенный ПРА (в большинстве, но не во всех случаях, со стартерными схемами), большин-

ство светильников с другими типами газоразрядных ламп (ДРЛ, ДРИ, ДНаТ, ДКсТ) поставляется комплектно с выносными ПРА.

Светильники с лампами накаливания маркируются на определенную номинальную мощность, которая является предельной, но могут использоваться в них и лампы меньшей мощности, имеющие тот же тип цоколя, конечно, в определенных пределах, потому что установка, например, в светильнике ламп мощностью до 200 Вт ламп 25 Вт явно бессмысленна и, кроме того, может привести к резкому искажению кривой силы света.

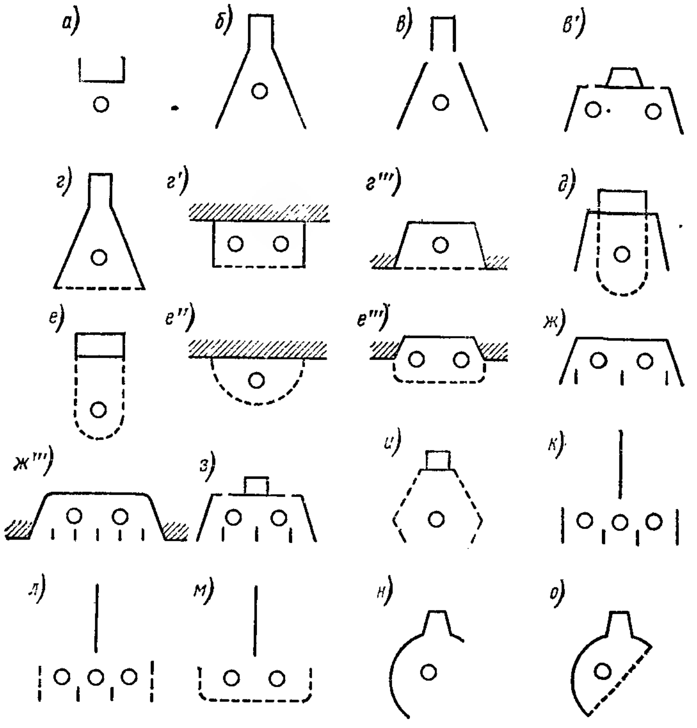

Рис. 2-14. Конструктивно-светотехнические схемы светильников

На рис. 2-14 показаны почти все применяемые конструктивно-светотехнические схемы светильников. Каждая из них может варьироваться в тех отношениях, что отражатель может быть диффузным, зеркальным или имеющим смешанное отражение, контактная полость может иметь или не иметь уплотнения, стеклянный колпак может выполняться из прозрачного, рифленого, матированного, опалового или молочного стекла и соединяться с корпусом с уплотнением или без него.

На рис. 2-14 сплошные линии обозначают непрозрачные отражающие поверхности, штриховые — стеклянные рассеиватели или

защитные стекла, короткие вертикали — планки экранирующей решетки. Штрихами обозначены принципиально не отличающиеся варианты схем: ′ — специально для люминесцентных ламп, ″ — для потолочных светильников, ‴ — для светильников, встраиваемых в потолки. Далее приводятся пояснения особенностей и областей применения светильников с разными конструктивно-светотехническими схемами.

Патрон с лампой накаливания (рис. 2-14, *а*) в матированной колбе или блок с открытой люминесцентной лампой применяется в тех случаях, когда не требуется ограничения слепящего действия: при установке в устройствах отраженного света, в помещениях очень малой площади, где сами размеры помещения создают «естественный защитный угол» (рис. 1-10), иногда в проходах за электрическими щитами и т. д.

На рис. 2-14, *б* приведена основная, широко применяемая схема светильников прямого света с любыми лампами, при эмалированных отражателях имеет кривую силы света типа Д, при алюминиевых или иных отражателях со смешанным или зеркальным отражением может иметь также кривые типов К, Г или Л. При прочих равных условиях предпочтительно использование эмалированных отражателей, особенно в тяжелых условиях среды. Схема может быть использована в помещениях с повышенным содержанием негорючей пыли, но тогда желательно (особенно при наличии проводящей пыли) иметь уплотнение контактной полости (исполнения 5′ и 6′).

Светильник, изображенный на рис. 2-14, *в*, отличается от изображенного на рис. 2-14, *б* тем, что между корпусом и отражателем имеется просвет (а при использовании люминесцентных ламп отражатель имеет перфорацию), что обеспечивает некоторую подсветку верхней зоны помещения. В остальном характеристики и область применения такие же, как у светильников на рис. 2-14, *б*.

Светильник на рис. 2-14, *г* в светотехническом отношении эквивалентен изображенному на рис. 2-14, *б*, конструктивно отличаясь наличием плоского или выпуклого стекла, закрывающего выходное отверстие. Если это стекло укреплено с уплотнением, то схема становится оптимальной для помещений, содержащих пыль. Варианты этого светильника относятся в основном к люминесцентным светильникам, в которых уплотнение стекла возможно, но применяется крайне редко. Эти варианты, без уплотнения, часто применяются в общественных зданиях, но их существенным недостатком является отсутствие подсветки потолков.

Традиционная схема светильников прямого света приведена на рис. 2-14, *д* для помещений с наличием влаги и пыли, хотя для последних схема далека от оптимальной. Эти светильники используются при невозможности применения изображенных на рис. 2-14, *б* (например, из-за пожароопасности помещения) и 2-14, *г*. При отсутствии уплотнений защитное стекло (в данном

случае рассеивающее) служит для ограничения слепящего действия. Кривые силы света почти всегда типа Д.

Столь же традиционны светильники, изображенные на рис. 2-14, *е*, но уже классов Н или Р, для помещений с тяжелыми условиями среды. В этих светильниках применение защитных рассеивающих стекол обязательно. Характер светораспределения [обычно кривая типа М, в вариантах (рис. 2-14, *е″* и *е‴*) — иногда типа Д] обеспечивает хорошую вертикальную освещенность, освещение высокорасположенных поверхностей и подсветку верхней зоны, что определяет широкое применение светильников в помещениях с нормальной средой, когда, конечно, уплотнений не требуется. По схеме рис. 2-14, *е″* выпускаются разнообразные потолочные светильники с лампами накаливания, как с уплотнениями — для тяжелых условий среды, так и без уплотнений — для общественных зданий. К вариантам светильников (рис. 2-14, *е″* и *е‴*) относятся также и многочисленные потолочные светильники для люминесцентных ламп, широко применяемые в общественных и отчасти в производственных зданиях.

Светильники, изображенные на рис. 2-14, *ж* и *з* являются модификациями изображенных на рис. 2-14, *б* и *в*, они предназначены специально для люминесцентных ламп. Большие размеры этих ламп и обычная установка в светильнике нескольких ламп (ввиду их малой единичной мощности) затрудняют создание защитного угла с помощью только отражателя и вызывают необходимость применения экранирующих решеток: системы пересекающихся продольных и поперечных планок, разбивающих выходное отверстие на ряд мелких элементов. Светильники, не имеющие рассеивателей, должны снабжаться решетками в помещениях небольшой и средней высоты, причем в помещениях с наличием пыли применение решеток нежелательно.

Решетки не только создают необходимый защитный угол, но и улучшают внешний вид светильника, а в светильниках для общественных зданий, световых панелях, потолках и т. п. разнообразнейшей формы решетки часто становятся элементом светового оформления интерьера.

Для люминесцентных светильников наиболее характерны эмалированные отражатели, в связи с чем они обычно имеют типовую кривую силы света Д. Применение решеток, ограничивая силу света в наклонных направлениях, приближает кривую силы света к типу Г. Однако в некоторых случаях (высокие помещения, специальные требования к распределению освещенности) используются и зеркальные отражатели, с помощью которых можно получить нужную кривую силы света в поперечной плоскости при сохранении косинусного характера продольной кривой. Эффективно трансформировать последнюю можно с помощью экранирующих решеток с зеркальными планками или призматических стекол.

Светильники (рис. 2-14, *и*) широко применяются в жилых и общественных зданиях, преимущественно с лампами накаливания. Стекло здесь должно быть рассеивающим, молочным. В этих светильниках хорошо сочетаются благоприятный внешний вид, экономичность и качество освещения. Выпускавшийся по этой схеме светильник «Люцетта» имел, пожалуй, наибольшее распространение по сравнению со всеми остальными светильниками.

Светильник неожиданно оказался весьма перспективным в помещениях с большой сыростью, но без пыли (до бань и прачечных включительно) при условии, если головка светильника имеет соответствующее исполнение, т. е. выполнена из водостойких материалов и имеет раздельный ввод проводников. Раньше это достигалось сочетанием стекла «Люцетта» с фарфоровым подвесным патроном. Промышленного выпуска светильников в такой модификации организовано не было.

Светильники на рис. 2-14, *к* и *л* близки друг к другу и отличаются лишь наличием прозрачных или непрозрачных боковин. Имея светораспределение класса В, реже Р, они рекомендуются для общественных, отчасти — для производственных зданий с нормальными условиями среды, при высоких требованиях к качеству освещения.

Светильник (рис. 2-14, *м*) имеет ограниченное применение — почти исключительно в жилых помещениях. Светораспределение класса В.

Светильники (рис. 2-14, *н* и *о*) с наклонно расположенными отражателями, со стеклом или без него, известны под видовым названием «кососветы». Их применение целесообразно в случаях, когда освещаемые поверхности, особенно вертикальные, расположены по одну сторону от возможного места установки светильников, например при размещении последних на стенах на кронштейнах. В практике «кососветы» нередко заменяются наклонно установленными светильниками других схем.

Здесь не рассмотрены светильники с призматическими стеклами, пока мало распространенные в отечественной практике (кроме светильников наружного освещения). Между тем такие стекла, используя явление преломления света, могут создать весьма целесообразное для ряда случаев светораспределение и, в частности, резко ограничить значения силы света в направлениях, особо неблагоприятных из-за слепящего действия, т. е. 60—90° с вертикалью, без создания защитного угла как такового.

Подробные сведения по расчету и конструированию светильников для люминесцентных ламп содержатся в книге [8].

2-11. ЩЕЛЕВЫЕ СВЕТИЛЬНИКИ-СВЕТОВОДЫ

В традиционной системе освещения светильниками можно усмотреть известное противоречие: световой поток должен быть распределен по непрерывной поверхности площади или полосы, а для этого используются многочисленные дискретные излучатели, каждый из которых требует установки, обслуживания и подведения электрической энергии. Хотя в естественном освещении большую (но не всегда положительную) роль играет прямой солнечный свет, но в основном природа использует другое решение, распределяя свет сверхмощного источника — Солнца по всему небосводу. Сказанное можно рассматривать как логическую предпосылку для создания принципиально нового средства освещения: щелевых светильников-световодов (ЩСС). Идея создания ЩСС и их перво-

начальная теоретическая и конструктивная разработка принадлежат Г. Б. Бухману, в дальнейших работах по созданию ЩСС приняли участие многие организации и лица [9].

Пусть в торец длинной цилиндрической трубки (рис. 2-15) вводится мощный световой поток источников света. В пределах дуги *acb* труба выполнена из материала, внутренняя поверхность которого является зеркальной и имеет очень высокий коэффициент отражения; в пределах дуги *ab*, называемой щелью, труба выполнена из светопрозрачного, обычно — рассеивающего материала.

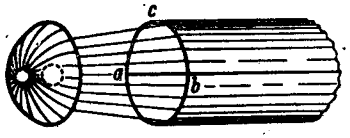

Рис. 2-15. Принципиальная схема щелевого светильника-световода

Лучи, падающие на поверхность зеркальной части трубы под достаточно большими углами, будут отражаться, идти по трубе дальше, отражаться повторно и т. д., причем часть светового потока будет попадать на щель и выходить через нее. Предпосылками того, чтобы значительная часть введенного потока не только вышла через щель, но и с достаточной равномерностью распределилась по всей длине последней, является строго рассчитанная структура светового потока в месте ввода и высокий коэффициент отражения зеркальной поверхности трубы. При соблюдении этих условий можно добиться довольно высокого к. п. д. ЩСС и сравнительно равномерной яркости щели на протяжении длины, достигающей 30 и 70 диаметров трубы соответственно при одно- и двустороннем вводе в нее потока.

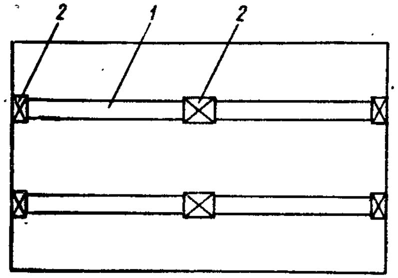

Рис. 2-16. Размещение каналов (*1*) щелевого световода и вводных устройств (*2*) в цехе

Для того чтобы выходящий из щели световой поток мог создать нормированную освещенность на значительных площадях, в ЩСС необходимо вводить очень большие потоки, причем источники света должны быть достаточно компактными, поэтому наиболее подходящими для световодов источниками света являются лампы ДРИ. Разработаны в частности, вводные устройства на 8 ламп по 3500 Вт каждое, причем вводы могут быть как односторонними, устраиваемыми с торца трубы, так и двухсторонними, устанавливаемыми «в рассечку» двух труб. На рис. 2-16 показана схема размещения щелевых светильников-световодов в цехе с использованием вводов обоих типов.

В зависимости от мощности вводного устройства изменяется диаметр трубы, лежащий обычно в пределах 250—1100 мм.

Трубы ЩСС выполняются как из тонких пленочных материалов, требующих для сохранения формы при их работе постоянной поддувки воздухом, так и жесткие, не требующие поддувки.

В своем развитии ЩСС выросли в систему комплектных осветительных устройств КОУ, включающих в себя специальные камеры для размещения вводных устройств, электроаппаратуры для питания и управления источниками света, вентиляционных установок и т. д. Здесь для мощных осветительных установок возможно осуществление «глубокого» ввода, т. е. подведение сети 6—10 кВ непосредственно к вводам с установкой у последних трансформаторов.

Световоды имеют весьма своеобразное светораспределение, резко несимметричное в продольной плоскости, с максимумом в направлении, противоположном ближайшему вводу. Из-за этого световод с одним вводом освещает преимущественно одну сторону вертикальной поверхности, перпендикулярной оси ЩСС. В различных сечениях по длине ЩСС светораспределение различно. Эти обстоятельства затрудняют расчет освещенности от ЩСС, который практически возможен лишь с помощью ЭВМ, но, по-видимому, в практике расчет будет заменяться выбором одного из типовых, заранее рассчитанных вариантов.

Первый опыт применения ЩСС дал весьма положительные результаты. ЩСС, в частности, хорошо вписываются в интерьер помещения и, вероятно, найдут применение не только в производственных, но и в общественных зданиях.

Установившихся технико-экономических показателей по применению ЩСС еще нет, но уже известно, что во многих случаях они дают существенное уменьшение годовых расходов, а во всех случаях — значительное упрощение обслуживания, так как резко уменьшается число точек, требующих такового. Особенно перспективно применение ЩСС во взрывоопасных помещениях.

Знаменательно, что основная линия развития ЩСС, еще до их массового внедрения, уже получила интересные и перспективные «ответвления». Так, в цехах обработки светочувствительных материалов традиционным способом освещения являются локальные фонари красного или оранжевого света, работа при которых утомительна для глаза, особенно если требуется просмотр проявляемых материалов на просвет. Освещение с помощью ЩСС значительно улучшает условия работы в этих цехах, причем в качестве источников света здесь целесообразно применение натриевых ламп, свет которых содержит относительно мало актиничных лучей, которые необходимо поглотить светофильтрами.

В музеях имеются витрины со столь ценными материалами, что доступ к ним разрешен только ответственным хранителям, что затрудняет устройство здесь встроенного освещения. В таких случаях в витрины можно встроить канал ЩСС, почти не требующий обслуживания, а вводное устройство с источником света разместить вне запретной для монтера зоны.

На основе ЩСС может быть создан также ряд оригинальных решений в установках архитектурно-художественного освещения.

Нередко в технике освещения возникает необходимость создать высокую освещенность на малой площади, подчас расположенной во внутренних полостях оборудования или изделий, причем требуется, чтобы осветительное устройство не загромождало рабочую зону. В таких случаях весьма перспективным является применение

особого рода световодов — волоконных, основанных на явлении полного внутреннего отражения. Такие световоды, которые не следует смешивать с аналогичными устройствами, служащими для передачи изображения, изготовляются в виде гибких жгутов любой длины и пропускают около 50% света, вводимого через один из торцов. Вынеся вводное устройство, для которого перспективно применение миниатюрных ламп КГ, из рабочей зоны, можно, не загромождая эту зону, «поливать» светом любой ее участок.

2-12. ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ ОБЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ

К видимой части спектра примыкает со стороны коротких длин волн невидимое ультрафиолетовое (УФ) излучение, получившее за последние десятилетия широкое применение в различных отраслях техники.

Воздействие УФ-излучений необходимо для нормальной жизнедеятельности человеческого организма. Его недостаток вызывает «ультрафиолетовое голодание», при котором ослабевают защитные силы организма, происходит авитаминоз, наступает расстройство нервной системы и т. д.

Обычное силикатное стекло плохо пропускает УФ-излучение, и уже по этой причине все искусственные источники света, имеющие колбу из такого стекла, почти не имеют в своем спектре УФ-излучения. Ничтожно мало их и в спектре ламп КГ, хотя и имеющих колбу из кварцевого стекла. Естественно, что мало УФ-излучений проникает и в здания через остекленные окна, но даже и вне зданий периоды ультрафиолетового голодания могут наблюдаться у жителей северных широт при коротком световом дне и у жителей больших городов с их замутненной атмосферой.

Отсюда возникает необходимость специальной искусственной компенсации недостатка УФ-излучения путем устройства облучательных установок длительного действия — в системе общего освещения, или кратковременного действия — в фотариях. В дальнейшем пойдет речь только о первой группе облучательных установок.

Воздействие УФ-излучений на человека количественно оценивается эритемным действием, т. е. покраснением кожи, в дальнейшем переходящим в загар. Соответственно система световых единиц заменяется при УФ-излучении системой эритемных единиц и вводятся понятия: эритемный световой поток (миллиэры, мэр), эритемная сила света (мэр/ср) и эритемная облученность (мэр/м^2).

Кривая интенсивности эритемного действия УФ-излучения в зависимости от длины волны имеет два резких максимума: при $\lambda = 0{,}25$ мкм и $\lambda = 0{,}297$ мкм, в промежутке между которыми эритемное действие обращается в нуль при $\lambda = 0{,}28$ мкм. Признается полезной (при правильной дозировке) и используется в облучательных установках только правая ветвь кривой в пределах $\lambda = 0{,}28 \div 0{,}32$ мкм. Для получения излучения в этой области применяются эритемные люминесцентные лампы низкого давления ЛЭ мощностью 15 и 30 Вт и такие же, но лампы ЛЭР с отражателем 30 и 40 Вт. Эритемная отдача ламп лежит в пределах 20—40 мэр/Вт. Размеры этих ламп и их электрические характеристики такие же, как обычных люминесцентных ламп, и эритемные лампы могут применяться в обычных светильниках.

Основные требования к устройству облучательных установок содержатся в утвержденных Министерством здравоохранения СССР указаниях к проектированию и эксплуатации установок искусственного ультрафиолетового облучения на промышленных предприятиях (1974 г.) и некоторых других документах.

Согласно этим требованиям облучательные установки длительного действия должны устраиваться в помещениях зданий, расположенных севернее полярного круга, а в зданиях, расположенных между 45° широты и полярным кругом, — только в помещениях без естественного освещения или с недостаточным (коэффициент естественной освещенности меньше 0,1%) естественным освещением. Они должны при этом устраиваться только в помещениях с постоянным пребыванием не менее 10 чел., при высоте помещений не менее 3 м и не более 8 м и при площади, приходящейся на одного человека, не более 6 м^2. Эти установки должна также оборудоваться в основных помещениях детских учреждений.

Режим их включения должен устанавливаться в зависимости от широты места, а именно: при широте севернее 60° — с 1 ноября по 1 апреля, при широте 50—60° — с 1 ноября по 1 марта и при широте 45—50° — с 1 декабря по 1 марта. В помещениях для работы они включаются на 8 ч ежедневно; в помещениях для детей — на 4—6 ч.

При ультрафиолетовом облучении нормируется средняя облученность в горизонтальной плоскости на уровне 1 м от пола 5 мэр/м^2, но одновременно устанавливаются значения минимальной (1,5 мэр/м^2) и максимальной (7,5 мэр/м^2) облученности. Последнее ограничение необходимо, чтобы избежать вредной переоблученности. Поэтому расчет облучательных установок начинается с проверки максимальной облученности в точках непосредственно под светильниками. Коэффициент запаса вводится только при расчете минимальной облученности.

В остальном расчет облучательных установок ведется так же, как осветительных установок, с учетом отмеченных ниже специфических особенностей. Потребная мощность облучательных установок длительного действия относительно невелика и обычно лежит в пределах 1—2 Вт/м^2.

Как уже сказано, силикатное стекло и обычные марки органического стекла почти непрозрачны для УФ-излучений. Отражающие поверхности также ведут себя при УФ-излучений иначе, чем при видимом свете. Хорошо отражают УФ-излучение поверхности полированного алюминия и меловая побелка. Известковая

побелка имеет $\rho = 0{,}11 \div 0{,}30$; такие же материалы, как белила, белая эмаль и водоэмульсионная краска, имеют $\rho < 10\%$.

При установке эритемных ламп в специальных светильниках материалы светильников выбираются с учетом их свойств при УФ-излучении, и исходной для расчета облучательных установок является кривая распределения эритемной силы света. Пока чаще приходится устанавливать эритемные лампы в светильниках для обычных люминесцентных ламп, и поскольку в этих светильниках применяются материалы, почти не отражающие УФ-излучение, расчет ведется как для открытой лампы с учетом ее экранирования конструктивными частями светильника. Ввиду пониженных требований к точности расчета лампа принимается за светящую точку, но учитывается, что в продольной плоскости она имеет кривую Д, а в поперечной — кривую М.

Светильники, используемые для эритемных ламп, должны иметь снизу экранирующую решетку с защитным углом в обеих плоскостях не менее 25°. В ряде случаев целесообразно применять установки отраженного света.

Светильники с эритемными лампами могут как включаться централизованно, так и управляться местными выключателями, но во всех случаях их управление должно быть отделено от управления светильниками, предназначенными для освещения. Допускается питание эритемных ламп отдельными группами от щитков основного освещения, однако к этим группам не должны присоединяться светильники рабочего или аварийного освещения.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ

3-1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА

Обычной задачей расчета освещенности является определение числа и мощности светильников, необходимых для обеспечения заданного значения освещенности. Значительно реже выполняются поверочные расчеты, т. е. определение ожидаемой освещенности при заданных параметрах установки.

Расчет может выполняться с большой степенью точности, но чаще всего такой точности не требуется. Характеристики ламп и светильников имеют значительные допуски, и как бы тщательно ни был выполнен расчет, никоим образом нельзя гарантировать, что получится точно заданная освещенность. Существенно также, что самые нормы освещенности не являются строго обоснованными, и тот компромисс между желаемым и возможным, о котором говорилось выше, сохраняется на определенном участке шкалы освещенностей.

Повышенная точность расчетов нужна преимущественно при сопоставлении и выборе различных вариантов выполнения освещения. В этих случаях с учетом равной для всех вариантов вероятности отклонения результатов от расчетных данных можно считать предпочтительным тот вариант, в котором данные осветительные условия достигаются хотя бы при незначительно лучших показателях.

При освещении «точечными» источниками света, т. е. лампами накаливания, а также лампами типов ДРЛ, ДРИ и ДНаТ, обычно число и размещение светильников намечаются до расчета, в процессе же расчета определяется необходимая мощность лампы. При выборе лампы по стандартам допускается отклонение номинального потока лампы от требуемого расчетом в пределах от —10 до +20%. При невозможности выбрать лампу, поток которой лежит в указанных пределах, изменяется число светильников.

При освещении трубчатыми люминесцентными лампами до расчета обычно намечается число и расположение рядов светильников, по результатам же расчета производится «компоновка рядов», т. е. определение числа и мощности светильников, устанавливаемых в каждом ряду. При этом отклонения ожидаемой освещенности от заданной должны также не превышать вышеуказанных пределов.

Все применяемые приемы расчета основаны на двух формулах, связывающих освещенность с характеристиками светильников и ламп:

$$E = \frac{\Phi}{S} \text{ и } E = \frac{I \cos \alpha}{r^2},$$

принципиальная разница между которыми состоит в том, что первая из них, будучи написана в недифференциальном виде, определяет среднюю освещенность поверхности, а вторая — освещенность конкретной точки на поверхности.

Метод, основанный на первой формуле, носит название метода коэффициента использования. В своих обычных формах он позволяет обеспечить среднюю освещенность горизонтальной поверхности с учетом всех падающих на нее потоков, как прямых, так и отраженных. Переход от средней освещенности к минимальной в этом случае может осуществляться лишь приближенно. Метод, основанный на второй формуле, — точечный метод, позволяет обеспечить заданное распределение освещенности на как угодно расположенных поверхностях, но лишь приближенно учесть свет, отражаемый поверхностями помещения.

Соответственно этим особенностям метод коэффициента использования применяется для расчета общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей, а также для расчета наружного освещения в случаях, когда нормирована средняя освещенность. Точечный метод применяется для расчета общего равномерного и локализованного освещения помещений и открытых пространств, а также для расчета местного освещения при любом расположении освещаемых поверхностей. Его область применения для расчета внутреннего освещения ограничена, однако, случаями, когда

достаточен приближенный учет света, отражаемого поверхностями помещения, т. е. когда применяются светильники класса П, а при плохо отражающих поверхностях — также класса Н.

Мы видим, что области применения обоих методов частично перекрывают друг друга, но что имеется случай, в котором, казалось бы, не может применяться ни один из методов.

Действительно, общее равномерное освещенне горизонтальной поверхности без точного учета отраженного света может быть с равным успехом рассчитано любым из методов. Обычно в этнх случаях предпочитают пользоваться более простым методом — методом коэффициента нспользования, но для больших, ответственных помещений желательно пользоваться точечным методом, позволяющнм не только обеспечнть заданную наименьшую освещенность, но и проанализировать распределение освещенности по всей освещаемой поверхности.

Наоборот, нз ранее сказанного следует, что для расчета локализованного освещения или освещення негоризонтальных поверхностей в случаях, когда отраженный свет играет значительную роль, непосредственно не может быть применен ни один метод. В этих случаях приходится, как показано далее, использовать нх оба, т. е. действовать, можно сказать, комбинированным методом.

Светотехнические расчеты являются одними из наиболее массовых инженерных расчетов; их приходится постоянно выполнять многим тысячам людей, а в своих первоначальных формах они являются довольно трудоемкими. Естественно, что усилия специалистов издавна были направлены на упрощение методики расчета, в результате чего появилось много практических способов расчета, которые, однако, являются разновидностью тех же двух основных методов. Из этих упрощенных способов ниже описываются лишь получившие широкое применение или рекомендуемые к такому применению. Полному и детальному рассмотрению вопросов расчета освещения посвящена книга автора «Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения» [10].

3-2. МЕТОД КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Пусть в помещении установлено N светильников, поток ламп в каждом из которых Φ, так что всего в помещение внесен поток $N\Phi$. Далеко не весь этот поток падает на освещаемую поверхность (т. е. на пол или равновеликую ему горизонтальную плоскость на уровне h_p от пола), так как он частично теряется в светильниках, частью падает на стены и потолок помещения. Отношение потока, падающего на освещаемую поверхность, ко всему потоку ламп называется коэффициентом использования и обозначается η. Таким образом полезным потоком можно считать $N\Phi\eta$. Распределяясь по площади S, этот поток создает на ней среднюю освещенность $N\Phi\eta : S$.

Если, как это чаще всего имеет место, расчет ведется на минимальную освещенность, которая всегда меньше средней, то, введя коэффициент минимальной освещенности $z = E_{ср} : E_{мин}$, получим

$$E_{мин} = \frac{N\Phi\eta}{Sz}.$$

Так как нормированная освещенность должна быть обеспечена во все время эксплуатации, надо эту освещенность разделить на коэффициент запаса k, получив окончательно

$$E = \frac{N\Phi\eta}{Szk}. \quad (3\text{-}1)$$

Имея в виду использовать формулу (3-1) для определения светового потока или числа светильников, получаем

$$\Phi = \frac{NSzk}{N\eta} \quad (3\text{-}2)$$

и

$$N = \frac{ESzk}{\Phi\eta}. \quad (3\text{-}3)$$

Входящий в формулы коэффициент z зависит от размеров и формы помещения, коэффициента отражения его поверхностей, характеристик светильника и в наибольшей степени от значения $\lambda = L : h$ (рис. 2-5). Последнее обстоятельство имеет особо принципиальное значение. С увеличением λ сверх оптимальных значений коэффициент z начинает быстро возрастать, что собственно и обусловливает энергетическую невыгодность больших значений λ.

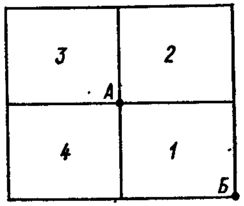

Рис. 3-1. Неравномерность освещения в больших помещениях

В больших помещениях принципиальное значение имеет и увеличение коэффициента z при уменьшении λ по сравнению с оптимальными значениями. Рассмотрим предельный случай, когда размеры помещения неограниченно велики, стены и потолки не отражают свет и $\lambda \to 0$. Тогда все множество светильников может рассматриваться как сплошная светящая поверхность, и, если точка A в центре помещения (рис. 3-1) одинаково освещается всеми четырьмя квадрантами, то угловая точка $Б$ настолько удалена от квадрантов *2—4*, что освещается только квадрантом *1*, т. е. ее освещенность в 4 раза меньше, чем точки A. Таким образом предельное значение $z = 4$.

В большинстве случаев этот факт не имеет большого практического значения и не учитывается, но иногда может служить основанием для уменьшения размеров полей вблизи стен больших помещений.

В области оптимальных значений λ коэффициент z относительно невелик; точное его определение связано с такими трудностями, которые не оправдываются результатом, и обычно довольствуются учетом приближенных значений z, равным 1,15 при освещении светильниками, расположенными по вершинам полей, и 1,1 — при освещении линиями люминесцентных светильников. При расчете средней освещенности коэффициент z, естественно, не учитывается; в установках отраженного света при хорошо отражающих стенах этот коэффициент приближается к единице.

Коэффициент использования η:

прямо пропорционален коэффициенту полезного действия светильников;

зависит от формы кривой силы света светильников, возрастая с увеличением степени концентрации светильниками светового потока и убывая с увеличением доли потока, направляемой светильником в верхнюю часть пространства;

возрастает с увеличением площади помещения, так как при этом увеличивается телесный угол, в пределах которого поток падает непосредственно на расчетную поверхность;

возрастает с уменьшением расчетной высоты (по той же причине);

убывает по мере удаления формы помещения от квадрата, так как при этом уменьшается среднее расстояние светильников от стен и увеличивается доля светового потока, падающего на стены;

возрастает, хотя и незначительно, с увеличением λ, так как при этом увеличивается среднее расстояние светильников от стен;

возрастает с увеличением коэффициентов отражения потолков, стен и полов помещения.

Зависимость η от площади помещения, высоты и формы возможно учесть одной комплексной характеристикой — индексом помещения

$$i = \frac{S}{h(A+B)}, \tag{3-4}$$

где A и B — стороны помещения; S — его площадь; h — расчетная высота. Зависимость индекса помещения от S и h очевидна; зависимость его от формы помещения становится особенно ясной, если, обозначив $A : B = \alpha$, привести выражение (3-4) к виду

$$i = \frac{\sqrt{S}}{h}\frac{\sqrt{\alpha}}{1+\alpha}. \tag{3-5}$$

При $\alpha = 1$ имеем $i = 0{,}5\sqrt{S} : h$, при $\alpha = 2$ индекс $i = 0{,}47\sqrt{S} : h$. Это дает основание в некоторых упрощенных приемах расчета для не слишком удлиненных помещений определять индекс по формуле

$$i = 0{,}48\frac{\sqrt{S}}{h}. \tag{3-6}$$

Для помещений неограниченной длины из выражения (3-4) следует, что $i = B : h$.

Зависимость η от к. п. д. и формы кривой силы света учитывается тем, что для каждого светильника (или для группы светильников с близкими характеристиками) составляется отдельная таблица коэффициентов использования; при расчете значений η для этой таблицы принимается характерное для данного светильника значение λ, чем учитывается также зависимость от коэффициента отражения потолков. Коэффициенты отражения существующих помещений оцениваются субъективно, проектируемых помещений

— предположительно, но во всех случаях точные значения их неизвестны, и в таблицах принимается шкала усредненных значений 70—50—30—10% — для потолков и стен и 30—10—0% — для пола. Эти коэффициенты обозначаются $\rho_п$ — для потолка, $\rho_с$ — для стен и $\rho_р$ — для пола или расчетной плоскости. В таблицах приводятся обычно только наиболее вероятные (вообще или для области применения данного светильника) их сочетания. Точность, с которой могут быть определены значения η, как правило, не оправдывает интерполирования ни между значениями коэффициентов отражения, ни между значениями индекса помещения. При $i > 5$ принимается значение 5. В дальнейшем предполагается расширение шкалы индексов в сторону значений, меньших 0,5.

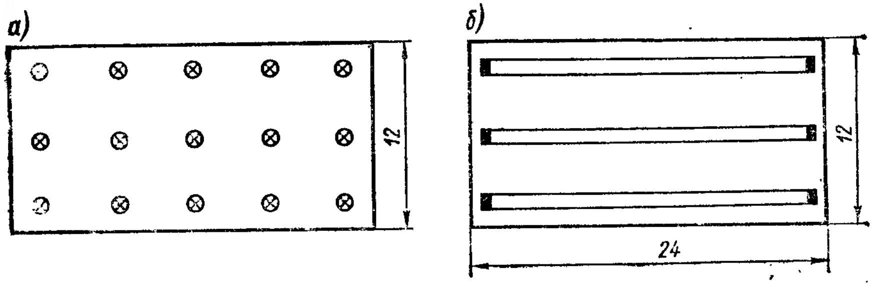

Рис. 3-2. Варианты освещения помещения светильниками с лампами накаливания (*а*) и светильниками с люминесцентными лампами (*б*)

В табл. 3-1 приведены значения коэффициентов использования светового потока.

Порядок расчета по методу коэффициента использования поясняется примерами.

1. Дано помещение размерами: $A = 24$ м, $B = 12$ м, $H = 4{,}5$ м, $h_р = 0{,}8$ м; коэффициенты отражения: $\rho_п = 50\%$, $\rho_с = 30\%$, $\rho_р = 10\%$. Требуется осветить это помещение светильниками «Астра» с лампами накаливания, создав освещенность $E = 50$ лк при $k = 1{,}3$.

Светильник «Астра» имеет кривую светораспределения типа Д, для которого можно принять $\lambda_с = 1{,}4$. Приняв $h_с = 0{,}5$ м, получим $h = 3{,}2$ м и $L = 3{,}2 \cdot 1{,}4 = 4{,}5$ м. Учитывая, что $\lambda_э$ несколько больше, чем $\lambda_с$, размещаем светильники, как показано на рис. 3-2, получив $N = 15$.

Находим

$$i = \frac{288}{3{,}2\,(24+12)} = 2{,}5$$

и по табл. 3-1 определяем $\eta = 0{,}59$. Принимая $z = 1{,}15$, вычисляем потребный поток лампы

$$\Phi = \frac{50 \cdot 1{,}3 \cdot 288 \cdot 1{,}15}{15 \cdot 0{,}59} = 2432 \text{ лм.}$$

Ближайшая стандартная лампа 200 Вт имеет $\Phi = 2800$ лм, что превышает расчетное значение на 15%.

Если бы в том же примере нам требовалось получить освещенность не 50 лк а 75 лк, то потребный поток лампы составил бы 3648 лм. Поскольку светильник

Таблица 3-1

Значение коэффициентов отражения $\rho_п$, $\rho_с$, $\rho_р$ при использовании светильников типа	Значение коэффициента использования η, %, при значении индекса помещения *i*, равном																
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0
«Астра» 70; 50; 10	22	32	39	44	47	49	50	52	55	58	60	62	64	66	68	70	73
50; 30; 10	20	26	34	38	41	43	45	47	50	53	55	57	59	62	64	66	69
0; 0; 0	16	21	29	33	36	37	39	41	44	46	49	51	53	56	59	60	62
УПД ДРЛ 70; 50; 10	30	36	40	43	45	47	50	53	56	58	60	62	63	66	67	69	70
50; 30; 10	23	30	33	37	40	41	43	47	50	53	56	57	59	60	61	63	66
0; 0; 0	18	26	29	33	35	38	40	42	45	48	51	52	53	56	57	58	60
ЛДОР 70; 50; 10	25	29	33	36	40	43	45	47	51	54	56	58	60	62	63	64	67
50; 30; 10	19	22	26	30	33	36	38	40	44	47	49	51	53	55	56	58	60
0; 0; 0	12	16	20	22	25	28	30	32	35	38	40	42	43	45	46	48	50

«Астра» пригоден только для ламп до 200 Вт, пришлось бы, задавшись потоком лампы мощностью 200 Вт, обратным приемом найти потребное число ламп $N = 19,5$. практически же разместить и три ряда 21 светильник.

2. В том же помещении требуется создать освещенность $E = 300$ лк при $k = 1,5$. используя люминесцентные лампы типа ЛБ в светильниках ЛДОР. Так как светильник имеет в поперечной плоскости кривую светораспределения типа Д, для которого $\lambda = 1,4$, размещаем светильники в три ряда.

При ранее найденном значении индекса (табл. 3-1) находим $\eta = 0,53$.

Определяем потребный поток ламп уже не в светильнике (число светильников пока неизвестно), а в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 288 \cdot 1,1}{3 \cdot 0,53} = 89\,660 \text{ лм}.$$

Если в светильники установить по две лампы 40 Вт, с потоком 3000 лм, то потребное число светильников в ряду будет $89\,600 : 6000 = 14,9 \approx 15$. При длине одного светильника 1,24 м их общая длина составит 18,6 м. Следовательно, между светильниками ряда могут быть оставлены небольшие разрывы, величину которых нетрудно рассчитать.

При использовании ламп 80 Вт ($\Phi = 5220$ лм) в ряду потребовалось бы разместить с округлением 9 светильников общей длиной 13,8 м. Разрывы между светильниками возросли бы, а общая мощность увеличилась бы с 3,6 до 4,3 кВт. Вариант с лампами 40 Вт представляется предпочтительным.

Если бы в условиях данного примера требовалось создать освещенность 500 лк, то при лампах 40 Вт потребовалось бы 25 светильников в ряду, которые не вмещаются в длину помещения 24 м; вместе с тем это число недостаточно для устройства сдвоенных рядов. При лампах 80 Вт в этом случае необходимо иметь в каждом ряду 14 светильников, которые хорошо размещаются. Можно было бы обойтись и лампами 40 Вт, но разместить светильники в четыре ряда по 19 шт. в каждом. В этом случае предпочтение следует отдать лампам 80 Вт.

3-3. УПРОЩЕННЫЕ ФОРМЫ МЕТОДА КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Массовый характер расчетов по методу коэффициентов использования вызвал появление целого ряда приемов расчета, упрощающих вычисления по этому методу. Это понятно, так как, например, сократить лишь одну операцию умножения, требующую 15 с, значит в масштабах нашей страны сберечь не менее 5 лет человеческого труда ежегодно.

Вместе с тем все упрощенные приемы расчета связаны с неизбежным, хотя обычно и допустимым, уменьшением точности расчета, а также с увеличением потребного числа справочных таблиц или графиков. Последнее вызвано тем, что каждая таблица или график применимы только в пределах указанных на них «паспортных данных»: расчетная высота, коэффициенты отражения стен и потолков, коэффициенты *z* и *k*.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ПОМЕЩЕНИЯ

Для ускоренного определения индекса помещения уже очень давно и широко применяется предложенная И. С. Дубинкиным табл. 3-2. В ней помещения разделены по значению $\alpha = A : B$ на три группы: $\alpha = 1 \div 1,5$; $\alpha = 1,5 \div 2,5$; $\alpha = 2,5 \div 3,5$. Придавая расчетной высоте *h* ряд дискретных значений в соответствии с вы-

Таблица 3-2

Форма помещения	Расчетная высота, м					Индекс помещения
$\alpha = 1\div1{,}5$	3	3,2	3,4	3,6	. . .	
$\alpha = 1{,}5\div2{,}5$	2,8	3	3,2	3,4	. . .	
$\alpha = 2{,}5\div3{,}5$	2,6	2,8	3	3,3	. . .	
Площадь помещения, м²	⋮ 130	⋮ 147	⋮ 165	⋮ 188	⋮	
						2,0
	168	189	213	241		
						2,25
	209	236	266	301		
						2,5
	280	317	360	406		
						3,0
	390 ⋮	440 ⋮	500 ⋮	560 ⋮	⋮	

ражением (3-5), нетрудно рассчитать, в пределах каких значений площади S то или иное значение индекса помещения по стандартной шкале, приводимой в таблицах, является ближайшим к точному значению.

Так, для примера (§ 3-2) в табл. 3-2 для $\alpha = 1{,}5\div2{,}5$ находим $h = 3{,}2$ м, опускаясь вниз, находим линию между значениями площади 266 и 360 м² и, двигаясь вправо, выходим на индекс 2,5.

Большинство упрощенных способов определения числа и мощности светильников исходят из пренебрежения формой помещения и определения индекса по выражению (3-5). Соответственно эти способы пригодны при $\alpha \leqslant 2{,}5$, но, как исключение, применяются и при больших значениях α с тем, чтобы в этом случае расчет производился для условно выделяемой части помещения площадью $2B^2$, а его результат экстраполируется на всю площадь.

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ ПО УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Из упрощенных приемов расчета в отечественной практике наибольшее применение получили предложенные автором таблицы удельной мощности w. Для каждого данного помещения при выбранной освещенности и типе светильника существует точное решение задачи освещения, если предположить осуществимым любое, включая дробное, число светильников и любую, в пределах пригодности светильника, мощность лампы. Этому точному решению

соответствует определенное значение удельной мощности, и если выбрать число и мощность светильников так, чтобы фактическая удельная мощность была наибольшим возможным приближением к «теоретическому» значению, то задача будет решена с достаточной точностью. Таблицы удельной мощности и содержат ее теоретические значения, но для обеспечения относительной компактности таблиц эти значения приходится принимать неизменными в пределах определенных интервалов высоты h и площади S. Границы интервалов выбираются с таким расчетом, чтобы от одного интервала к другому значение w изменялось в среднем на 20%, чем, в основном, и определяется погрешность способа. Употребительные интервалы высот: 1,5—2; 2—3; 3—4; 4—6; 6—8 м. Паспортными данными таблиц являются тип светильника, а также значения k, z, $\rho_п$, $\rho_с$, $\rho_р$. Форма таблиц и методика их составления несколько различны для различных источников света.

Для ламп типа ДРЛ можно пренебречь зависимостью световой отдачи от номинальной мощности лампы. В таком случае между освещенностью и удельной мощностью существует прямая пропорциональная зависимость и в целях сокращения объема таблиц уместно составлять их для освещенности 100 лк с пропорциональным пересчетом в других случаях.

Из формулы (3-2) с учетом, что $\Phi = CP$ (где C — световая отдача ламп, лм/Вт; P — мощность, Вт), легко получить

$$w = \frac{Ekz}{C\eta}. \qquad (3\text{-}7)$$

Выбираются опорные значения по шкале индексов помещения: 0,5—0,7—0,9—1,1—1,5—2,0—3,0—4,0. Каждому индексу, как следует из выражения (3-6), соответствует площадь

$$S = 4{,}35 i^2 h^2, \qquad (3\text{-}8)$$

причем значение h принимается средним для интервала. Для каждого i по таблице находится η и по формуле (3-7) вычисляется удельная мощность w. Строятся вспомогательные кривые $w = f(S)$, по которым прочитываются и заносятся в таблицы значения w для середин принятых интервалов площади.

Построение подобного рода вспомогательных кривых нередко применяется и в других расчетах. Это позволяет при небольшом числе рассчитываемых опорных точек дать большее число результативных данных и в известной степени страхует от ошибок, наличие которых в расчетах выдает себя изломом кривых.

Лампы накаливания характерны тем, что их световая отдача монотонно возрастает с увеличением единичной мощности. Поскольку при бóльших освещенностях применяются более мощные лампы, между освещенностью и удельной мощностью нет прямой пропорциональной зависимости и значения w приходится рассчитывать для каждой освещенности отдельно. Значение световой отдачи учитывается тем, что для каждого сочетания h, S и E

определяется ожидаемое число светильников и выбирается мощность лампы по специально построенной кривой $\Phi = f(P)$, без округления до стандартных значений. Эта мощность принимается как наиболее вероятная для определения значения w. Определение числа светильников N производится исходя из значения λ, рекомендованного для данного светильника, для чего используется следующий прием.

При размещении светильников по вершинам квадратов со стороной $L = \lambda h$ площадь поля составит $\lambda^2 h^2$ и приближенно $N = S : \lambda^2 h^2$.

С учетом того что расстояние крайних светильников до стен принимается равным примерно $\frac{1}{3} L$, более точное выражение для N имеет вид:

$$N = \left(\frac{\sqrt{S}}{\lambda h} + 0{,}3 \right)^2$$

или, согласно выражению (3-6),

$$N = \left(2{,}1 \frac{i}{\lambda} + 0{,}3 \right)^2. \qquad (3\text{-}9)$$

Окончательно методика расчета w для каждого интервала высот и значения освещенности принимает следущий вид.

Выбираются опорные значения i и находятся значения S и $\bar{\eta}$, как при использовании ламп ДРЛ, т. е. без учета зависимости w от мощности ламп. Находится N по формуле (3-9), причем значения, меньшие двух; округляются до ближайшего большего целого. Потребный поток лампы находится по формуле (3-2), а ее мощность — по кривой $\Phi = f(P)$. Удельная мощность вычисляется по формуле

$$w = \frac{NP}{S}. \qquad (3\text{-}10)$$

Далее строятся графики $w = f(S)$ и находится среднее значение w для каждого интервала площадей. Если потребный поток превышает поток лампы наибольшей мощности, на которую рассчитан светильник, то удельная мощность определяется непосредственно по выражению (3-7), куда подставляется значение C для наибольшей возможной мощности лампы.

Обычно при расчете освещения по удельной мощности задаются всеми параметрами установки и числом светильников N, по таблице находят w и выбирают мощность лампы, ближайшей к определяемой из выражения $wS : N$. Менее желательно задаваться значением P и находить N.

Удельная мощность общего равномерного освещения светильниками «Астра» приведена в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Расчетная высота h, м	Площадь помещения S, м²	Удельная мощность, Вт/м², при освещенности, лк, равной						
		5	10	20	30	50	75	100
3—4	10—15	3,6	6,1	12,3	16,4	25	35,8	45,8
	15—20	2,9	4,9	9,1	12,9	21,4	28,7	38,8
	20—30	2,4	4	7,3	10,6	17,4	23,2	31
	30—50	1,9	3,3	5,8	8,5	13,4	18,8	24
	50—120	1,6	2,8	4,8	7,3	11,3	15,6	19,9
	120—300	1,3	2,3	4,1	6,1	9,5	13	16,7
	300	1,1	1,9	3,6	5,3	8,2	11	14,6
4—6	10—17	5	9,3	20,4	25,5	32,8	50	66,6
	17—25	3,7	7,1	14,6	19,3	26,9	41,6	55,5
	25—35	2,7	5,1	9,7	13,1	20,4	31,7	42,3
	35—50	2,2	3,8	7,5	10,4	16,2	24,2	32,2
	50—80	1,8	3,1	5,9	8,4	12,9	19	25,3
	80—150	1,5	2,6	5,0	7,0	10,6	15,6	20,8
	150—400	1,2	2,2	4,2	5,9	9	13,4	17,8
	400	1	1,8	3,4	4,9	7,4	10,9	14,5

Примечание. Таблица составлена для значений: $\rho_п = 50\%$, $\rho_c = 30\%$, $\rho_р = 10\%$, $k = 1{,}3$, $z = 1{,}15$.

Решим с помощью этой таблицы пример § 3-2. При заданных высоте, площади и освещенности находим в табл. 3-3 $w = 9{,}5$ Вт/м² и определяем мощность лампы

$$P = \frac{288 \cdot 9{,}5}{15} = 182 \approx 200 \text{ Вт}.$$

Как и при «точном» расчете, оказалась выбранной такая же лампа и также с некоторым избытком мощности.

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ ПО УСЛОВНОЙ МОЩНОСТИ

Широко распространенный в практике способ расчета освещения по удельной мощности имеет, однако, определенные недостатки. Установление неизменных значений для определенных интервалов высоты h, и особенно, площади S понижает точность расчета. Тот факт, что для каждого сочетания условий задания учтена лампа определенной мощности, а значит, и световой отдачи, делает значения w относительно точными лишь для случаев, когда значение λ соответствует принятому при составлении таблиц. В связи с этим рассмотрим одно из возможных усовершенствований этого способа.

Будем называть условной удельной мощностью w' значения удельной мощности, рассчитанные для освещенности 100 лк и световой отдачи 10 лм/Вт. Произведение этой величины на площадь назовем полной условной мощностью $П$. Ее можно найти элементарным преобразованием выражения (3-7):

$$П = \frac{EkzS}{C\eta} = \frac{10kzS}{\eta}. \qquad (3\text{-}11)$$

Задаемся несколькими характерными значениями h и опорной шкалой индексов, так же как и при использовании ламп ДРЛ. Для каждого индекса находим площадь по формуле (3-8), а значение η, берем из табл. 3-1, после чего по выражению (3-11) вычислим значения $П$ и перенесем их на график: $П = f(S)$ (рис. 3-3).

Полная мощность, т. е. произведение мощности каждого светильника P на число светильников N, должна равняться значению $П$, повторно рассчитанному с учетом освещенности и световой отдачи:

$$PN = П\frac{10}{C}\frac{E}{100},$$

или, произведя сокращение и учитывая, что $PC = \Phi$,

$$\Phi N = \frac{ПE}{10}.$$

Обозначив коэффициент

$$K = \frac{10\Phi}{E},$$

получим окончательно

$$KN = П. \qquad (3\text{-}12)$$

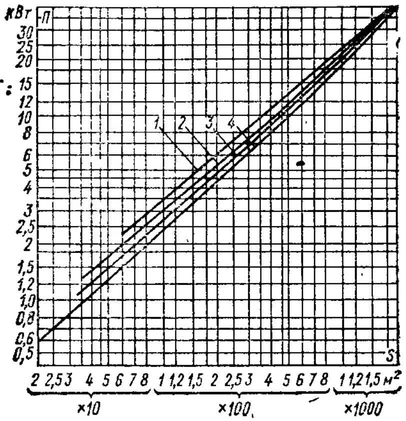

Рис. 3-3. Зависимость полной условной мощности светильника Гс от площади помещения при $\rho_п = 30\%$, $\rho_c = 10\%$, $k = 1{,}3$, $z = 1{,}15$

1 — расчетная высота h = 12 м; *2* — h = 8 м; *3* — h = 6 м; *4* — h = 4 м

Значения K определяются лишь световым потоком лампы накаливания и нормой освещенности и фрагментарно представлены в табл. 3-4. Теперь, найдя по графику рис. 3-3 значение $П$ и задавшись характеристиками определенной лампы, т. е. зная K, мы по формуле (3-12) находим K, если же задано N, то по этой же формуле находим K, а по табл. 3-4 подбираем лампу с необходимыми параметрами.

Так, если задано S = 1200 м², h = 6 м, E = 75 лк и N = 20, то с помощью рис. 3-3 находим $П$ = 23 000 Вт, вычисляем K = = 23 000 : 20 = 1150 и по табл. 3-4 выбираем ближайшую лампу 500 Вт.

При этом способе, пригодном для любых источников света, устранены основные недостатки расчета освещения по удельной мощности.

При использовании ламп накаливания, а также ламп ДРЛ и ДРИ мощность P и число светильников N имеют ограниченное число возможных значений. В отношении значения P это определяется стандартом на лампы, что касается N, то ясно, например, что на каждой ферме может быть установлено 1, 2 или 3 светильника, но не дробное число их. Равным образом в помещениях с гладкими потолками можно равномерно разместить не любое

Таблица 3-4

Освещенность E, лк	Значение коэффициента K при условной мощности P, Вт, равной					
	150	200	300	500	750	1000
30	666	933	530	2770	4370	6200
50	400	560	920	1660	2620	3720
75	266	373	613	1106	1750	2480
100	200	280	460	830	1310	1860
150	133	186	306	553	875	1240

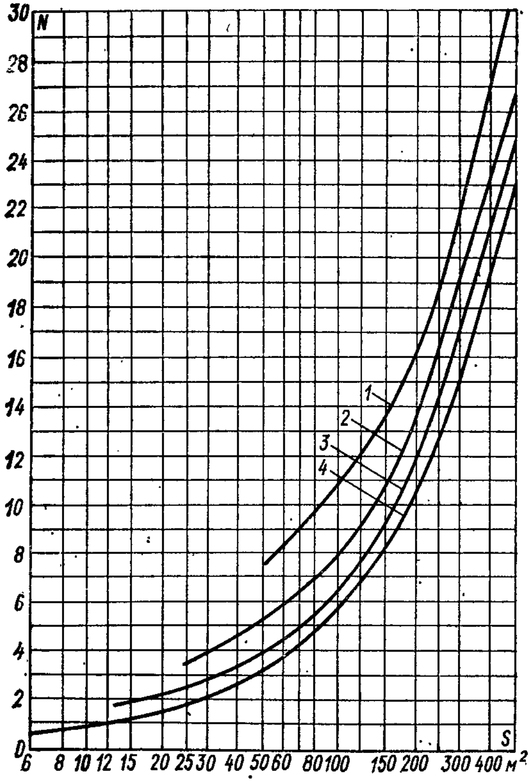

Рис. 3-4. График для определения числа светильников ЛДОР с лампами ЛБ 2×40 при $\rho_п = 50\%$, $\rho_c = 30\%$

1 — расчетная высота $h = 6 \div 8$ м; *2* — $h = 4 \div 6$ м; *3* — $h = 3 \div 4$ м; *4* — $h = 2 \div 3$ м

число светильников, и, например, при форме помещения, близкой к квадрату, не размещаются 3, 7 или 11 светильников. Вследствие этого результат расчета освещения по удельной мощности приходится округлять до возможных значений P или N при высокой вероятности того, что принятое решение будет ближайшим возможным к точному. При использовании люминесцентных ламп хотя N и остается дискретным, но значение его может меняться в каждом ряду с шагом, равным 1, что делает желательным его более точное определение.

Для упрощенного расчета люминесцентного освещения признаны наиболее целесообразными графики, впервые предложенные А. М. Гуровым и Ю. В. Прохоровым (рис. 3-4).

Начальная часть расчетов для построения графиков выполняется так же, как при составлении таблиц удельной мощности для ламп ДРЛ, после чего число светильников непосредственно определяется по формуле (3-3). Принимая $E = 100$ лк, $k = 1{,}5$, $z = 1{,}1$ и ведя расчет для наиболее употребительных ламп ЛБ-40, когда поток ламп в двухламповом светильнике равен 6000 лм, получаем

$$N = \frac{100 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}1 \cdot S}{6\,000 \cdot \eta} = 0{,}0275 \frac{S}{\eta}.$$

Рассчитанное значение N переносим на график для построения кривой в функции площади S.

Пересчет N на любое значение освещенности легко выполняется в уме, но, имея в виду возможность использования графиков для любых ламп, нетрудно составить таблицу, в которой будут содержаться коэффициенты для пересчета N на любой тип лампы и любую освещенность.

Вернемся к примеру 2 (§ 3-2). По графику рис. 3-4 непосредственно находим, что при освещенности 100 лк необходимо 16 светильников. При освещенности 300 лк, принятой в примере, нужно 48 светильников или 16 светильников в каждом ряду (в примере было рассчитано 15 светильников; расхождение на 6% лежит в пределах точности светотехнических расчетов вообще).

3-4. ТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД

Основным инструментарием точечного метода являются графики или таблицы, позволяющие непосредственно или после несложных вычислений определить освещенность любой точки поверхности, создаваемую светильником с известными параметрами; светораспределением, световым потоком ламп и геометрическими характеристиками, определяющими расположение светильника.

Из многих предлагавшихся приемов решения этой задачи для точечных излучателей (каковыми почти всегда можно считать светильники с лампами накаливания, а также лампами ДРЛ, ДРИ и ДНаТ) широкое применение получили три вида графиков, описываемых ниже. Все они составляются для светильников

с условным потоком лампы (или нескольких ламп суммарно) 1000 лм и предназначаются для определения освещенности горизонтальной поверхности.

КРИВЫЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ (Р. А. САПОЖНИКОВ)

Освещенность точки A горизонтальной поверхности (рис. 3-5) выражается формулой

$$E = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{h^2}, \qquad (3\text{-}13)$$

в которой будем считать силу света I_α заданной для условной лампы со световым потоком 1000 лм. Числитель этой формулы

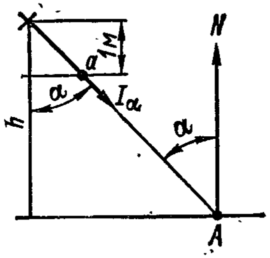

Рис. 3-5. Освещенность точки

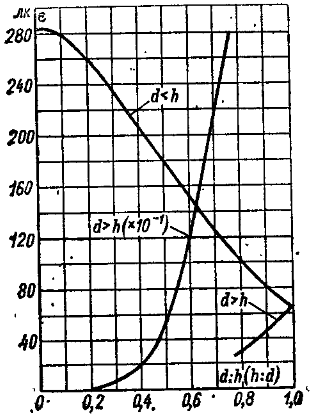

Рис. 3-6. Кривые относительной освещенности для светильника УПД ДРЛ

назовем относительной освещенностью и будем обозначать ε. Эта величина численно соответствует освещенности точки a, расположенной на том же луче, что и точка A, но на плоскости, по отношению к которой высота установки светильника равна 1 м. Введя это обозначение, перепишем формулу (3-13), одновременно заменив для освещенности обозначение E на e, чтобы подчеркнуть, что освещенность рассчитывается не вообще, а для лампы 1000 лм.

Таким образом,

$$\varepsilon = I_\alpha \cos^3 \alpha \quad \text{и} \quad e = \frac{\varepsilon}{h^2}. \qquad (3\text{-}14)$$

Хотя относительная освещенность есть функция угла α, но ее удобнее изображать кривыми в функции отношения $d : h = \operatorname{tg} \alpha$, что соответствует абсциссе точки a на рис. 3-5. Чтобы, не увеличивая размеров графика и не уменьшая масштаба шкалы, иметь возможность пользоваться им при $d \gg h$, прибегают к условному приему, а иногда, когда с увеличением d оно становится больше,

чем h, заменяют аргумент на $h : d$, т. е. поворачивают кривую обратно к началу координат. Часть этой кривой, для повышения точности отсчета, иногда строится в десятикратном масштабе (для той же цели возможно применение логарифмических шкал). Пример графика относительной освещенности показан на рис. 3-6. Переход от относительной освещенности к освещенности данной конкретной поверхности производится в соответствии с выражением (3-14). Если же требуется найти освещенность не для лампы со световым потоком 1000 лм, а для лампы с потоком Ф, то дополнительно вводится множитель Ф : 1000 и основная формула приобретает вид:

$$E = \frac{\Phi\varepsilon}{1000h^2}. \quad (3\text{-}15)$$

Определим в качестве примера освещенность горизонтальной поверхности в точке, лежащей посередине между двумя светильниками УПД ДРЛ с лампами ДРЛ 400 Вт, подвешенными на высоте 6 м, на расстоянии 14 м друг от друга.

В данном случае $d = 7$ м, $h : d = 0{,}86$ и по нижней ветви графика определяем $\varepsilon = 41$ лк. Так как для лампы ДРЛ 400 Вт поток $\Phi = 19\,000$ лм, то, подставляя численные значения в формулу (3-15), получаем

$$E = \frac{19\,000 \cdot 2 \cdot 41}{1000 \cdot 6^2} = 43 \text{ лк.}$$

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИЗОЛЮКСЫ УСЛОВНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ (А. А. ТРУХАНОВ)

Кривые относительной освещенности позволяют вести расчет с высокой степенью точности, но требуют определения аргумента $d : h$ или $h : d$ и операции деления на h^2. Пользование пространственными изолюксами устраняет эти операции. Введенную ранее величину e — освещенность, создаваемую на конкретной поверхности от светильника с лампой 1000 лм, будем называть условной освещенностью. При заданном светораспределении светильника эта величина является функцией параметров d и h и, следовательно, может быть изображена на плоскости семейством кривых или кривыми равных значений — изолюксами, построенными в координатной плоскости $d = h$. Легко убедиться, что на любом направлении α этой плоскости существует точка с любым заданным значением e, если только сила света светильника (а значит, и относительная освещенность ε) имеет для данного направления конечное значение. Одной из координат этой точки является направление α, второй — высота, определяемая согласно формуле (3-14) выражением

$$h = \sqrt{\varepsilon/e}. \quad (3\text{-}16)$$

Для построения графика на заготовленной сетке $d - h$ наносятся лучи направлений 0—5—15 и т. д. градусов (при разных масштабах для d и h, что иногда удобно, лучи проводятся по значениям tg α). Расположение точек изолюкс на каждом луче определяется по выражению (3-16), причем удобно значения ε и e

совмещать по квадратичной шкале логарифмической линейки, а h прочитывать по основной шкале. Полученные точки соединяются плавными кривыми. На рис. 3-7 приводится график для того же светильника, для которого были приведены кривые освещенности в. При тех же значениях d и h, что и в приведенном примере, находим по графику $e = 1{,}15$ лк, после чего с учетом двух светильников умножением на отношение Ф : 1000 находим $E = 43$ лк. Уже из этого примера видно, что отсчеты по графику, связанные с глазомерным интерполированием, менее точны, чем по кривым относительной освещенности, что окупается простотой пользования. Кривые относительной освещенности ε сохраняют, однако, значение для расчетов повышенной точности и теоретических анализов.

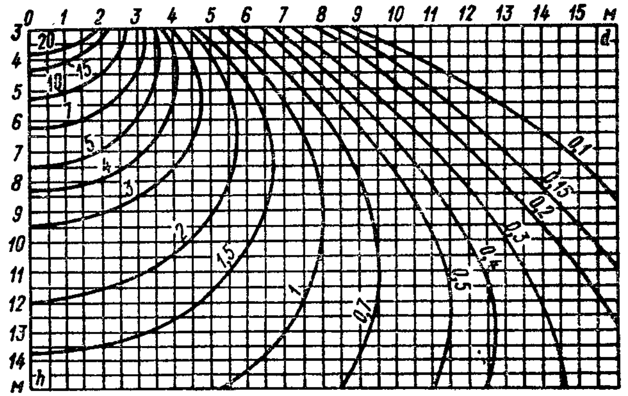

Рис. 3-7. Пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности для светильника УПД ДРЛ

Выбранные при построении графиков пределы шкал d и h отнюдь не ограничивают возможной области применения светильников, и пользование графиками возможно при значении этих размеров, выходящем за пределы шкалы. Пусть, например, нам требуется с помощью рис. 3-7 найти значение e при $h = 18$ м и $d = 14$ м. Уменьшив h и d в два раза, находим на графике для точки $h = 9$ м и $d = 7$ м значение $e = 1{,}3$ лк. Эта точка лежит на том же луче, что и заданная, а в этом случае освещенности обратно пропорциональны квадратам высот. Следовательно, для данной точки $e = 1{,}3 : 2^2 = 0{,}32$ лк.

Графики дают непосредственное суждение о наивыгоднейшей высоте установки светильника при заданном значении d. Так, из рис. 3-7 видно, что при $d = 8$ м светильник создает наибольшую возможную освещенность 1 лк при высоте $h = 10$ м.

Подобные графики могут использоваться и для расчета местного освещения, когда из-за малости расстояний светильники (особенно с люминесцентными лампами!) не могут быть приняты за точечные источники, но в этом случае их строят путем непосредственных измерений освещенности и для определенной мощности лампы, т. е. по ним находят не e, а E.

УСЛОВНЫЕ ИЗОЛЮКСЫ (Г. М. КНОРРИНГ)

Под таким названием известны графики, предназначенные для определения относительной освещенности от светильников с некруглосимметричным светораспределением, когда описанные выше графики неприменимы.

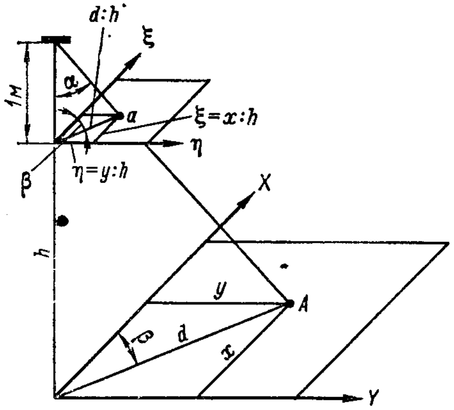

Рис. 3-8. Освещение точки несимметричным светильником

Для светильников с несимметричным светораспределением сила света определяется не только меридиональным углом α, но и азимутом β, соответственно чему освещенность точки A (рис. 3-8) определяется уже не двумя, а тремя параметрами: h, x, y или h, d, β. Для расчета удобно пользоваться графиком, показывающим распределение освещенности на условной плоскости, параллельной данной, но удаленной от светильника на 1 м, т. е. кривыми изолюкс относительной освещенности. Точке A на действительной плоскости соответствует точка a на условной плоскости с координатами $\xi = x : h$, $\eta = y : h$.

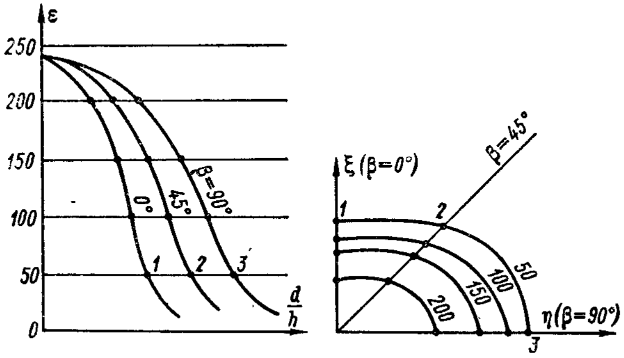

Рис 3-9. Перенос точек при построении изолюкс

На рисунке показан один квадрант освещаемой и, соответственно, условной плоскости. Этого достаточно, когда светораспределение светильника имеет две плоскости симметрии. При одной плоскости симметрии необходимо иметь график с двумя квадрантами, в наиболее общем случае — с четырьмя.

Для построения графика необходимы данные о светораспределении светильника для нескольких меридиональных плоскостей, т. е. для нескольких β. Для

каждого β строится обычная кривая относительной освещенности $\varepsilon = f\left(\frac{d}{h}\right)$, но без обращения аргумента при $d > h$. Пусть построены такие кривые для трех значений β (рис. 3-9). Отмечаем на них целые значения ε, для которых мы собираемся построить изолюксы, и абсциссы, соответствующие этим значениям, циркулем-измерителем переносим на сетку $\xi = \eta$. Несколько сложнее строятся графики для светильников с трубчатыми лампами, для которых даются только две кривые светораспределения — в продольной и поперечной плоскостях.

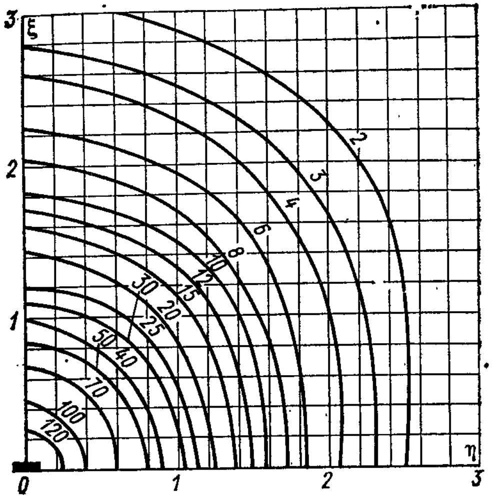

Рис. 3-10. Условные изолюксы для светильника ПВЛП

Для перехода от относительной освещенности к действительной сохраняется формула (3-15). Пример графика условных изолюкс приводится на рис. 3-10. Для того чтобы связать направления координатных осей ξ и η с определенным положением светильника, на графике схематически показаны контуры последнего.

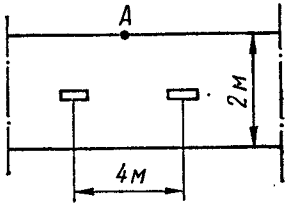

Рис. 3-11. Освещенность точки двумя светильниками

Определим освещенность точки A (рис. 3-11) от двух светильников ПВЛП с лампами ЛБ 2×40 ($\Phi = 2 \times 300$ лм), установленных на высоте 2,5 м. В данном случае $x = y = 2$ м, соответственно $\xi = \eta = 0{,}8$, следовательно, освещенность точки от одного светильника $\varepsilon = 27{,}5$ лк, а от двух светильников — 55 лк, откуда

$$E = \frac{6\,000 \cdot 55}{1\,000 \cdot 2{,}5^2} = 53 \text{ лк}.$$

Имея практические способы определения e или ε, перейдем к расчету освещения по точечному методу.

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Пусть в пределах поверхности (пока только горизонтальной) надо при выбранном типе и расположении светильников обеспечить наименьшую освещенность E при коэффициенте запаса k.

Измерив по плану расстояния d от точки до проекции каждого из ближайших светильников, находим по графикам пространственных изолюкс значения e или ε и, суммируя их, определяем

Σe или $\Sigma \varepsilon$. Освещенность, создаваемую удаленными светильниками, не учтенными в указанных суммах, а также светом, отраженным от стен и потолков помещения, учтем коэффициентом дополнительной освещенности μ. Тогда согласно выражению (3-15)

$$\Phi = \frac{1\,000Ek}{\mu\Sigma e} = \frac{1\,000Ekh^2}{\mu\Sigma\varepsilon}, \tag{3-17}$$

соответственно чему выбирается мощность лампы.

Для практического пользования этой формулой должны быть уточнены вопросы: в каких точках должна определяться Σe или $\Sigma \varepsilon$, какие светильники следует учитывать в качестве «ближайших», как определять коэффициент μ?

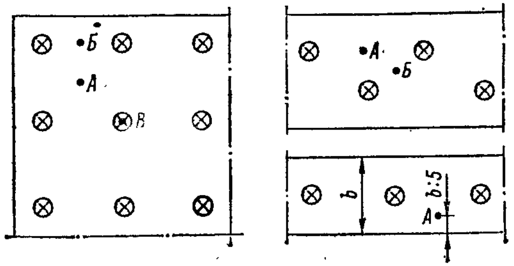

Рис. 3-12. Контрольные точки

Формальный ответ на первый вопрос ясен: расчет должен вестись для наименее освещенной (наихудшей) точки в пределах поверхности на которой должна быть обеспечена нормированная освещенность, т. е. для точки с наименьшим значением Σe или $\Sigma \varepsilon$. В ряде случаев для этого следует определить и сопоставить значение суммы освещенности для нескольких точек, которые можно считать характерными, но чаще всего можно ограничиться немногими точками, в которых наиболее вероятен минимум освещенности, нередко — даже одной точкой. При общем равномерном освещении крупных помещений основными контрольными точками является центр углового поля и середина его длинной стороны. Эти точки и некоторые другие случаи показаны на рис. 3-12. При локализованном освещении обычно легко наметить наихудшую точку в пределах конкретной освещаемой поверхности. В помещениях с многорядным расположением светильников в большинстве случаев не следует выбирать в качестве контрольных точки между крайними рядами светильников и стенами.

Трудно определить в общем виде понятие «ближайшие светильники», хотя при некотором навыке этот вопрос не вызывает затруднения.

С некоторой осторожностью можно сказать, что учитывать следует светильники до такого примерно значения d, при котором освещенность от каждого светильника становится меньше 5% освещенности от одного из ближайших светильников. На рис. 3-13 представлена часть неограниченного множества светильников, размещенных по вершинам квадратных полей. Четыре «первых» светильника расположены на расстояниях d от контрольной точки A, 8 «вторых» — на расстоянии $\sqrt{5}d$, 4 «третьих» — на расстоянии $3d$. В табл. 3-5 приведены значения освещенности от отдельных групп светильников при различных типовых кривых силы света и разных значениях $\lambda = L : h$. Из таблицы видно, что если при кривой Г во всех случаях достаточен учет «вторых» светильников, то при кривой М не всегда достаточен даже учет «третьих» светильников. Во всех случаях не должны учитываться светильники, от которых контрольная точка чем-либо затенена.

Таблица 3-5

Типовая кривая силы света	Значение $\lambda = L : h$	Освещенность (в относительных единицах) от светильников			
		первых	вторых	третьих	остальных
М	0,8	100	73	19	78
	1,4	100	39	9	27
	2,0	100	38	6	7
Г	0,8	100	14	1	1
	1,4	100	2	0	0
	2,0	100	0	0	0

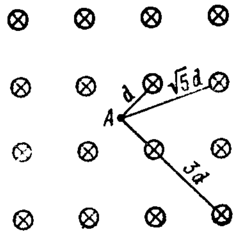

Рис. 3-13. Различные расстояния от контрольной точки до светильников

Точное определение коэффициента дополнительной освещенности μ чрезвычайно сложно, да в этом и нет особой необходимости. Чаще всего значение μ принимается в пределах 1,0—1,2 в зависимости от того, насколько тщательно произведено определение Σe или $\Sigma \varepsilon$ и какой коэффициент отражения имеют поверхности помещения. При светильниках, излучающих хотя бы небольшую часть потока в верхнюю полусферу, значение μ существенно увеличивается. В этом случае к его определению можно подойти следующим образом.

Пусть при фактических значениях коэффициентов $\rho_п$, $\rho_с$, $\rho_р$ коэффициент использования равен η_ρ, а при неотражающих поверхностях помещения («черное помещение») $\eta_ч$. Очевидно, что отражение света поверхностями помещения увеличивает освещенность в отношении $\eta_\rho : \eta_ч$, что и можно считать приближенным значением μ.

При значительной роли отраженного света точечный метод при расчетах освещения в его обычных формах становится непригодным.

Рассчитаем по точечному методу освещение помещения (рис. 3-14) светильниками УПД ДРЛ при следующих условиях: расчетная высота 6 м, норма освещенности 150 лк, коэффициент запаса 1,5, коэффициенты отражения потолка, стен и пола соответственно 50, 30 и 10% (указаны для оценки коэффициента μ и для

Таблица 3-6

Число светильников, шт	Расстояние d, м	Условная освещенность e, лк	Число светильников, шт.	Расстояние d, м	Условная освещенность e, лк
Для точки A			Для точки $Б$		
4	5,3	9,2	2	4	7,6
2	11	0,4	2	8	1,4
2	12,5	0,25	1	12	0,15
	$\sum e = 9{,}85$			$\sum e = 9{,}15$	

возможности проверки расчета освещения по методу коэффициента использования).

Так как наш светильник имеет светораспределение несколько более концентрированное, чем косинусное, т. е. $m > 1$, будем исходить из желательного значения $\lambda \approx 1{,}2$, соответствеино чему разместим 12 светильников по вершинам прямоугольных полей 7×8 м. Выберем в качестве контрольных точки A и $Б$. Расстояния d (в метрах) от этих точек до проекций учитываемых светильников (обмеренные по масштабу) указаны на рисунке. Расчет производится с помощью графика рис. 3-7. Приводимая табл. 3-6 соответствует применяемой на практике.

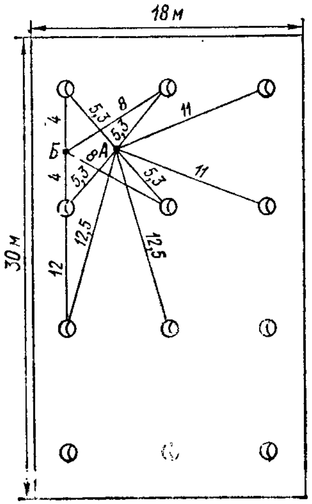

Рис. 3-14. Расчет освещенности точечным методом

Подставляем в формулу (3-17) значение $\sum e$ для точки $Б$; значение μ принимаем равным 1,15, тогда

$$\Phi = \frac{1000 \cdot 150 \cdot 1{,}5}{1{,}15 \cdot 9{,}5} = 21\,400 \text{ лм}.$$

С учетом разрешенного 10%-ного отклонения освещенности выбираем лампы 400 Вт, 19 000 лм. Почти тождественный этому получается световой поток при расчете освещения по методу коэффициента использования. Вообще же некоторые расхождения между результатами расчета различными способами неизбежны из-за приближенного значения некоторых коэффициентов.

В описанном виде точечный метод решает задачу определения мощности светильников при заданном их расположении. Обратная задача тоже разрешима, но с некоторыми усложнениями.

Уравнение (3-17) может быть решено относительно $\Sigma\, e$ (или $\Sigma\, \varepsilon$):

$$\sum e = \frac{1\,000 Ek}{\mu\Phi}, \qquad (3\text{-}18)$$

но дальнейшее решение легко выполнимо, только если известно, что в $\Sigma\, e$ ра́вно участвуют 2, 3 или 4 светильника. Тогда легко находится освещенность e от каждого светильника и по ней определяется значение d.

Пусть требуется определить, какова должна быть сторона квадратного поля, если светильники УПД-ДРЛ с лампами 400 Вт (19 000 лм) установлены на высоте 6 м и должны создавать в центре поля освещенность 200 лк при $k = 1{,}5$ и $\mu = 1{,}1$.

Подставляя значения величин в выражение (3-18), находим

$$\sum e = \frac{1\,000 \cdot 200 \cdot 1{,}5}{1{,}1 \cdot 19\,000} = 14{,}3 \text{ лк},$$

откуда $e = 14{,}3 : 4 = 3{,}6$ лк. Из рис. 3-7 находим, что такое значение имеет место при $d = 4{,}2$ м, т. е. $L = 4{,}2\sqrt{2} = 5{,}9$ м.

При таком значении L влияние «вторых» светильников уже достаточно велико и пренебрегать им не следует. Если бы при тех же условиях было бы задано $E = 500$ лк, то мы получили бы необходимую освещенность $e = 8$ лк, что недостижимо даже при $d = 0$; это указывает, казалось бы, на невыполнимость задания. Между тем, любой светильник с любой лампой может создать сколь угодно большую освещенность при неограниченном уменьшении значения L, но при учете всех действующих светильников.

В общем случае подобного рода задачи решаются следующим образом:

задаются несколько значений L;
при каждом значении L рассчитывается $\Sigma\, e$;
строится вспомогательный график $\Sigma\, e = f(L)$;
по формуле (3-18) находится нужное значение $\Sigma\, e$;
по вспомогательному графику определяются значение d, при котором $\Sigma\, e$ равно заданному.

Достоинством такого приема является точность решения задачи, так как исключается необходимость отступления от расчетного значения светового потока при выборе стандартной лампы.

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ НА НАКЛОННОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЯХ

Освещение наклонных и вертикальных поверхностей может рассчитываться непосредственно, но, поскольку основные графики составляются для горизонтальных поверхностей, общепринято определять значение величин E, e или ε в данной контрольной точке, но в условно проведенной через нее горизонтальной плоскости и умножать полученное значение на переходный коэффициент ψ.

Частично повторяя сказанное в § 1-1, напомним, что основой для определения коэффициента ψ служит теорема о том, что освещенности в общей точке двух поверхностей относятся как кратчайшие расстояния от этих поверхностей до светильника, причем большей является освещенность той поверхности, для которой указанное расстояние больше.

Наклон данной поверхности будем характеризовать двугранным углом θ, отсчитываемым от горизонтальной поверхности до неосвещенной стороны наклонной поверхности. Из рис. 3-15 следует, что для положения *1* наклонной поверхности кратчайшее расстояние до светильника $SБ = h\cos\theta + p\sin\theta$; аналогично

для положения 2, характеризуемого тем, что из проекции светильника на горизонтальную плоскость не видна освещенная сторона наклонной плоскости $SБ = h \cos\theta - p \sin\theta$. Так как кратчайшее

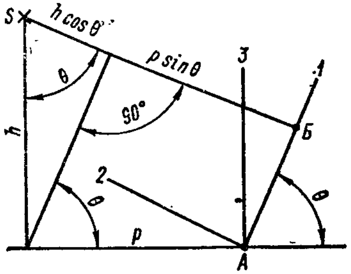

Рис. 3-15. Освещение наклонной поверхности (1, 2 и 3 — положения расчетных поверхностей)

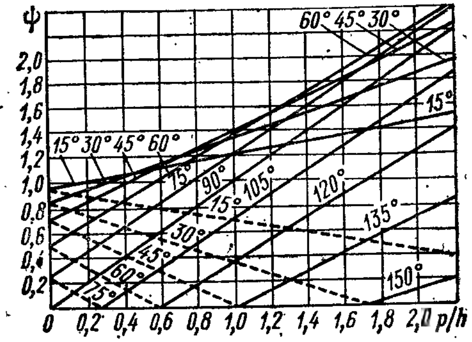

Рис. 3-16. График для определения ψ (числа у прямых обозначают угол θ)

расстояние светильника до горизонтальной плоскости есть h, то получаем

$$\psi = \cos\theta \pm \frac{p}{h} \sin\theta, \qquad (3\text{-}19)$$

причем знак плюс относится к положению 1, а минус — к положению 2. Для вертикальной плоскости (положение 3) $\psi = p : h$.

Под p во всех случаях понимается длина перпендикуляра, опущенного из проекции светильника на линию пересечения горизонтальной и наклонной поверхностей. Значение p, а значит, и ψ, одинаково для всех точек этой линии — при освещении одним светильником, и для всех точек и всего ряда светильников, если ось ряда параллельна этой линии.

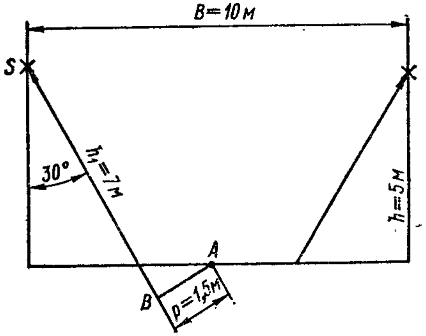

Рис. 3-17. Расчет освещенности от наклонного светильника

Поскольку ψ есть линейная функция p, удобно для его определения пользоваться графиком, предложенным Е. Н. Яковлевым (рис. 3-16). Штриховые линии на графике относятся к положению 2 наклонной поверхности.

Освещение от наклонно установленных светильников можно также рассчитывать по этому графику, проведя через контрольную точку условную плоскость, перпендикулярную осям светильников.

По отношению к этой плоскости, принимаемой за горизонтальную, освещаемая поверхность будет наклонной. Удобнее, однако, вести расчет, обмеряя размеры по масштабному чертежу разреза.

Пусть в помещении шириной $B = 10$ м на продольных стенах на высоте 5 м установлены светильники УПД ДРЛ при расстоянии между ними в ряду $L = 6$ м, причем светильники наклонены на угол 30° (рис. 3-17). Требуется обеспечить по оси помещения освещенность $E = 150$ лк при $k = 1{,}5$.

Выбираем контрольную точку A между двумя светильниками (в дальнейшем условно учитываются только по два ближайших светильника каждого ряда).

Проведя из A перпендикуляр к оси светильника, считаем плоскость AB горизонтальной. По отношению к ней обмером определяем $h_1 = 7$ м и $p = 1{,}5$ м.

Тогда $d = \sqrt{p^2 + (L:2)^2} = 3{,}35$ м, и по рис. 3-7 освещенность $e = 3{,}85$ лк. Переходя к действительной горизонтальной поверхности, умножаем значение e на $h : h_1 = 5 : 7$ и с учетом четырех светильников обоих рядов получаем $\Sigma e = 11$ лк.

Согласно выражению (3-17) и считая $\mu = 1$,

$$\Phi = \frac{1\,000 \cdot 150 \cdot 1{,}5}{1{,}1 \cdot 11} = 18\,600 \text{ лм},$$

соответственно чему выбираем лампу 400 Вт, 19 000 лм.

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ ОТ СВЕТЯЩЕЙ ЛИНИИ

Широкое внедрение люминесцентного освещения, при котором светильники преимущественно располагаются сплошными или прерывистыми рядами, придало особое значение задаче расчета освещения от светящих линий, под которыми будем понимать излучатели длиной более 0,5 высоты их установки (при меньшей длине погрешность от принятия излучателей за точечные источники невелика).

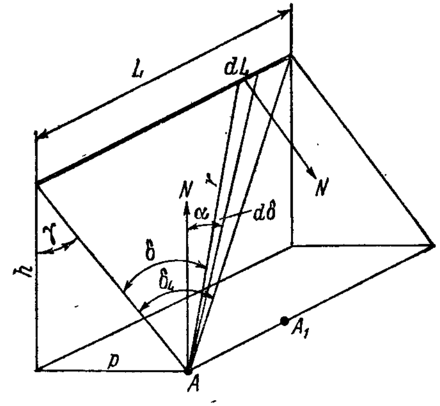

Рис. 3-18. Горизонтальный линейный излучатель

Расположение светящей линии относительно контрольной точки A (рис. 3-18) будем характеризовать размерами L, h, p. Задача первоначально решается для точки, расположенной против конца линии, но результат легко распространяется на другие случаи. Так (рис. 3-19), если точка лежит на протяжении линии, линия делится на две части, освещенность от которых суммируется, если же точка лежит вне пределов линии, эта линия дополняется воображаемым отрезком, освещенность от которого в дальнейшем вычитается.

Примем, что светораспределение линии в продольной плоскости подчиняется закону косинуса ($m = 1$), а в поперечной плоскости

задано кривой $I_\gamma = f(\gamma)$ и что сила света с единицы длины линии составляет I'.

Тогда элемент линии dL в направлении к точке A имеет силу света $dI = I'_\gamma \cos\delta dL$, и, учитывая, что $dL = r d\delta : \cos\delta$, получим $dI = I'_\gamma r d\delta$. Так как $\cos\alpha = h : r$ и $r^2 = (h^2 + p^2) : \cos^2\delta$, находим, что освещенность, создаваемая элементом dL, будет

$$dE = \frac{dI\cos\alpha}{r^2} = \frac{I'_\gamma h\cos^2\delta\, d\delta}{h^2 + p^2}.$$

Интегрируя это выражение в пределах от 0 до L, получим

$$E = \frac{I'_\gamma \cos^2\gamma}{2h}\left(\delta_L + \frac{\sin 2\delta_L}{2}\right). \qquad (3\text{-}20)$$

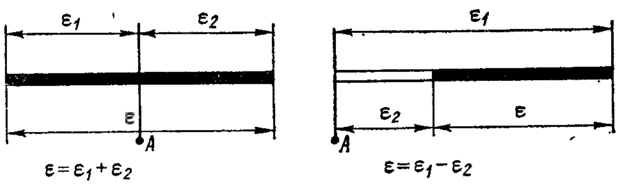

Рис. 3-19. Освещенность точек, не лежащих против конца линии

Для линий неограниченной длины $\delta_L \to 90°$ и выражение в скобках имеет предел $\pi : 2$. Приближение к этому пределу происходит весьма быстро, и при небольших значениях p уже линии, для которых $L > 3h$, практически могут рассматриваться как бесконечно длинные.

Для практических расчетов выражение (3-20) преобразуем следующим образом.

Световой поток ламп в линии, отнесенный к единице ее длины, назовем удельным потоком Φ'. Так как значение I_γ для светильников, из которых образуется линия, дается для условного потока 1000 лм, фактическая сила света светильника есть $I_\gamma\Phi : 1000$, а сила света с единицы длины

$$I'_\gamma = \frac{I_\gamma\Phi}{1\,000L} = \frac{I_\gamma\Phi'}{1\,000}.$$

Заменив далее δ, $\sin 2\delta$ и $\cos\gamma$ их выражениями через линейные размеры L, h, p, получим

$$E = \frac{\Phi'}{1\,000} I_\gamma \frac{h}{2(h^2+p^2)}\left(\frac{L\sqrt{h^2+p^2}}{L^2+h^2+p^2} + \operatorname{arctg}\frac{L}{\sqrt{h^2+p^2}}\right). \qquad (3\text{-}21)$$

При данных характеристиках элементов линии освещенность есть функция трех параметров: L, h, p, а такую функцию трудно представить графически. Поэтому введем приведенные размеры

$L' = L : h$ и $p' = p : h$ (рис. 3-20), что сведет число независимых переменных к двум, и подставим L', p' в формулу (3-21). Тогда

$$E = \frac{\Phi'}{1\,000h} I_\gamma \frac{1}{2(1+p'^2)}\left(\frac{L'\sqrt{1+p'^2}}{L'^2+p'^2+1} + \operatorname{arctg}\frac{L'}{\sqrt{1+p'^2}}\right) =$$

$$= \frac{\Phi'}{1\,000h} I_\gamma f(p', L'). \qquad (3\text{-}22)$$

Выражение $I_\gamma f(p', L')$ представляет собой освещенность, создаваемую линией при $h = 1$ м и $\Phi' = 1000$ лм/м, и с полным основанием может считаться относительной освещенностью ε. Таким образом, получаем

$$E = \frac{\Phi'\varepsilon}{1\,000h},$$

где

$$\varepsilon = I_\gamma f(p', L'). \qquad (3\text{-}23)$$

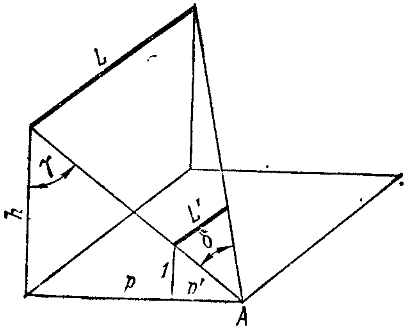

Рис. 3-20. Приведенные размеры при линейных излучателях

Так как контрольная точка может освещаться несколькими линиями, совместно создающими в ней относительную освещенность $\Sigma\varepsilon$, а также с учетом коэффициента запаса и коэффициента дополнительной освещенности получаем следующие, уже рабочие, формулы:

$$\Phi' = \frac{1\,000Ekh}{\mu\Sigma\varepsilon} \quad \text{и} \quad E = \frac{\Phi'\mu\Sigma\varepsilon}{1\,000kh}. \qquad (3\text{-}24)$$

Обращается внимание на то, что в этих формулах h стоит в первой степени. Действительно, освещенность от линий неограниченной длины и вообще от линий, видимых из точки под неизменным углом δ, изменяется обратно пропорционально первой степени высоты.

Для наглядности вообразим себе точку, равномерно излучающую по всем направлениям, неограниченно длинную линию, также светящую во все стороны, и неограниченно же большую поверхность, равномерно излучающую с одной стороны. Поток светящей точки распределяется по шару, площадь которого пропорциональна квадрату радиуса, поток светящей линии — по цилиндру, площадь которого пропорциональна радиусу, поток светящей поверхности — по параллельной ей плоскости, площадь которой от расстояния не зависит.

Большинство люминесцентных светильников не имеет в продольной плоскости строго косинусного светораспределения, причем чаще всего $m > 1$. Для этого случая выражение для освещенности от элемента линии составляется аналогично изложенному, но интегрирование выполняется с помощью ЭВМ и дает возможность получить достаточные для расчета значения $f(p', L')$ для различных m (см. табл. 3-7).

Таблица 3-7

L'	m	Значения f при длине p', м (верхняя строка), и угле γ, ...° (нижняя строка)									
		0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
		0	14	27	37	45	56	64	68	72	76
0,25	1,25	0,24	0,22	0,176	0,127	0,088	0,043	0,023	0,013	0,008	0,0036
	2,0	0,24	0,22	0,175	0,126	0,088	0,043	0,023	0,013	0,008	0,0036
	4,0	0,24	0,22	0,172	0,125	0,087	0,043	0,022	0,013	0,008	0,0036
0,50	1,25	0,43	0,40	0,32	0,234	0,165	0,082	0,044	0,025	0,016	0,007
	2,0	0,42	0,39	0,31	0,23	0,16	0,082	0,044	0,025	0,016	0,007
	4,0	0,40	0,37	0,30	0,22	0,16	0,08	0,043	0,025	0,016	0,007
1,00	1,25	0,63	0,59	0,48	0,37	0,27	0,143	0,08	0,048	0,03	0,014
	2,0	0,59	0,55	0,46	0,35	0,26	0,14	0,078	0,047	0,03	0,014
	4,0	0,51	0,48	0,40	0,31	0,23	0,13	0,074	0,045	0,029	0,014
1,50	1,25	0,70	0,66	0,55	0,43	0,32	0,18	0,105	0,065	0,042	0,02
	2,0	0,64	0,60	0,51	0,40	0,30	0,17	0,10	0,063	0,041	0,02
	4,0	0,53	0,50	0,42	0,33	0,26	0,15	0,09	0,058	0,038	0,02
2,00	1,25	0,73	0,68	0,57	0,45	0,35	0,20	0,12	0,077	0,051	0,025
	2,0	0,66	0,62	0,52	0,41	0,32	0,19	0,11	0,073	0,049	0,024
	4,0	0,53	0,50	0,42	0,33	0,26	0,16	0,10	0,065	0,044	0,023
3,00	1,25	0,74	0,70	0,59	0,47	0,36	0,22	0,14	0,09	0,062	0,032
	2,0	0,66	0,62	0,53	0,42	0,33	0,20	0,13	0,084	0,058	0,031
	4,0	0,53	0,50	0,43	0,34	0,27	0,16	0,10	0,071	0,05	0,028

Определение m может быть произведено решением формулы (1-16), а именно:

$$m = \frac{2\pi I_0}{\Phi_{\triangledown}} - 1, \qquad (3\text{-}25)$$

где I_0 — осевая сила света; $\Phi_{\triangledown}$ — поток нижней полусферы. Однако для некруглосимметричных светильников с двумя плоскостями симметрии под $\Phi_{\triangledown}$ следует понимать условный поток, определяемый по продольной кривой силы света так, как если бы светильник был круглосимметричным.

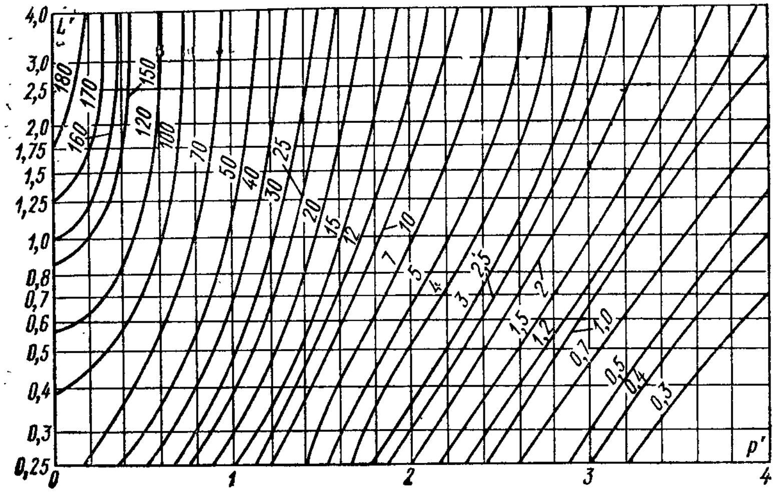

Рис. 3-21. Линейные изолюксы для светильника ЛДР

Поскольку освещенность ε при данном типе светильника зависит только от p' и L', представляется возможным построить кривые ее равных значений в координатной системе p' — L'. Эти кривые называются линейными изолюксами (рис. 3-21). Для их построения задаются последовательно возрастающими значениями L', и для каждого из этих значений, последовательно увеличивая p', находят по формуле (3-23) значения ε и строят вспомогательную кривую $\varepsilon = f(p')$. Точки этой кривой на оси абсцисс, соответствующие выбранным целым значениям ε, переносят на заготовленную сетку графика линейных изолюкс (так, как это выше описано для условных изолюкс) и соединяют полученные точки плавными кривыми. Чтобы точнее определить места пересечения изолюксами оси L' полезно аналогичным путем построить график $\varepsilon = f(L')$ и перенести с него значение точек на оси абсцисс на ось L'.

Анализ показывает, что если ряд линейных светильников имеет незначительные разрывы λ, то его можно рассматривать как непрерывный при условии, что

$\lambda \leqslant 0,5h$. В этом случае Ф′ определяется делением потока всех ламп ряда на полную, включая разрывы, длину ряда. При более значительных значениях λ каждый отрезок линии надо рассматривать отдельно и определять от него освещенность, пользуясь приемами, указанными на рис. 3-19; под Ф′ в этом случае понимается отношение потока ламп в данном участке к его длине.

Подобно тому как при точечных излучателях неравномерность освещения в пределах всего помещения повышается при малых значениях $L : h$ (см. рис. 3-1), неравномерность освещения при светящих линиях повышается с увеличением длины последних. В предельном случае, при очень длинных линиях, освещенность под концам линии вдвое меньше, чем под ее серединой, так как при $L' > 3$ освещенность почти не возрастает, и, если точка под концом ряда освещается одной условно-бесконечной линией, то точка под серединой линии освещается двумя такими же линиями.

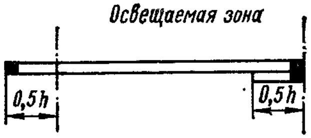

Рис. 3-22. Компенсации снижения освещенности у концов линии

Когда $L' > 2$ и когда освещается поверхность определенных размеров, это приходится учитывать, продлевая линию за пределы поверхности на длину, равную $0,5h$, или удваивать значение Ф′ на таком же протяжении у концов линии (рис. 3-22). В помещениях с равномерным освещением обычно ряды светильников доводятся почти до стен, и в предположении, что у самых торцевых стен

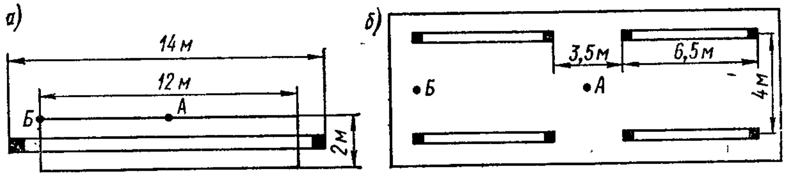

Рис. 3-23. Расчет светящихся линий: *а* — от одного протяженного ряда; *б* — от четырех полурядов

работы не производятся, контрольная точка условно выбирается на расстоянии h от конца линии. Тогда под центром линии будет обеспечена несколько бо́льшая освещенность, чем заданная, а под концом — несколько меньшая.

Рассчитаем осветительиую установку, представленную на рис. 3-23, *а*. Рабочие места расположены вдоль стола, н на них должна быть обеспечена освещенность 500 лк при $k = 1,5$. Над столом на высоте 2 м установлен ряд светильников ЛДР с лампами ЛБ.

Точка *А* освещается двумя полурядами, для каждого из которых $p' = 0,5$ и $L' = 3,5$. По графику рис. 3-21 определяем $\varepsilon = 135$ лк, $\varepsilon = 270$ лк. В данном случае, естествеино, $\mu = 1$ н, подставляя эти значения в формулу (3-24), находим

$$Ф' = \frac{1\,000 \cdot 500 \cdot 1,5 \cdot 2}{270} = 5\,550 \text{ лм/м}.$$

Полный световой поток ламп ряда должен быть $5550 \cdot 14 = 78\,000$ лм, что при двухламповых светильниках с лампами ЛБ-40 (Ф = 6000 лм) соответствует $78\,000 : 6000 = 13$ светильникам. Их общая длина $13 \cdot 1,24 = 16,2$ м. В данном случае плохо не то, что длина превышает заданную, а то, что фактическое значение Ф′ получается несколько меньше расчетного. Если применить лампы ЛБ-80 (поток двух ламп 10 440 лм), то число светильников составит $78\,000 : 10\,440 = 7,5$, с округлением 8 шт. при суммарной длине $8 \cdot 1,54 = 12,3$ м. При таком решении, если светильники разместить сплошным рядом, освещенность у концов ряда будет недостаточна, поэтому, соблюдая условия задания, размещаем их на длине 14 м, устраивая между светильниками разрывы $(14 - 12,3) : 7 = 0,25$ м $< 0,5h$. Расчетом можно убедиться, что в точке *Б* освещенность $\Sigma\varepsilon = 215$ лк, но трудно предположить, что работа будет производиться в самом углу стола, а уже на небольшом расстоянии от угла значение $\Sigma\varepsilon$ приближается к значению для точки *А*.

Расчет осветительной установки представленной на рис. 3-23, *б* производится при условии, что расчетная высота 3 м, освещенность 200 лк, $k = 1,5$, светильники ЛДР с лампами ЛБ. В средней части потолок занят оборудованием, и приходится сделать в рядах светильников вынужденные разрывы.

Определяя освещенность $\Sigma\varepsilon$ для точки *А*, каждую линию дополняем отрезком 1,5 м до перпендикуляра, проведенного из точки *А*. Для каждого дополненного полуряда $p' = 0,67$ и $L' = 2,67$, что дает значение $\varepsilon = 110$ лк. Но надо вычесть освещенность от добавленных несуществующих отрезков при $p' = 0,67$ и $L' = 0,5$, каждый из которых дает освещенность $\varepsilon = 60$ лк, в результате чего $\Sigma\varepsilon = 4\,(110 - 60) = 200$ лк. Подставляя эти значения в формулу (3-24), получаем $Ф' = 4500$ лм/м. Задача решается установкой в каждом отрезке линии пяти светильников с лампами 2×40 Вт, занимающих длину 6,2 м. Это достаточно близко к заданию, и вряд ли стоит устраивать небольшие разрывы между светильниками. Отмечается, что для точки *Б* освещенность $\Sigma\varepsilon = 220$ лк, причем два удаленных от нее отрезка линий практически не участвуют в создании освещенности.

3-5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Рассмотренные выше способы расчета охватывают случаи, повседневно встречающиеся при проектировании и устройстве осветительных установок. В полном объеме теория светотехнических расчетов весьма сложна и включает задачи, решаемые на основе специальных разделов высшей математики, некоторые же вопросы вообще не имеют окончательного решения.

В данном параграфе рассматривается некоторая часть задач в объеме, необходимом как для ознакомления с наиболее общими принципами светотехнических расчетов, так и для практической работы в области техники освещения. Относящиеся к этим задачам справочные графики и таблицы приводятся в сокращенном виде; более полный комплект их можно найти в книге [10].

Как и в предшествующем изложении, рассматриваемые методы расчета позволяют найти либо среднюю освещенность поверхности, т. е. они основаны на коэффициенте использования, либо освещенность в определенной точке. Нередко эти методы используются совместно.

Определение освещенности в точке от точечных и линейных излучателей было рассмотрено в § 3-4. Здесь познакомимся с определением освещения, создаваемого диффузно излучающей поверхностью.

Пусть поверхность произвольной формы и расположения S (рис. 3-24) имеет яркость L и светимость $M = L\pi$, требуется найти освещенность точки A. Выделим на поверхности «точечный» элемент dS, удаленный от точки на расстояние r и имеющий силу света $dI = L\,dS\cos\beta$. Этот элемент создает в точке освещенность

$$dE = \frac{L dS \cos\alpha \cos\alpha}{r^2},$$

но

$$\frac{dS\cos\beta}{r^2} = d\omega,$$

что приводит к выражению $dE = L\,d\omega\cos\alpha$.

Интеграл этого выражения

$$E = L\int^{S} d\omega\cos\alpha \qquad (3\text{-}26)$$

дает освещенность от всей поверхности S и выражает один из основных законов теоретической светотехники.

Подынтегральное выражение может быть графически интерпретировано следующим образом: окружим точку A полусферой единичного радиуса; вырезка на этой полусфере, образованная совокупностью направлений на dS, численно равна $d\omega$, а проекция этой вырезки на экваториальную плоскость P равна $d\omega\cos\alpha$. Это остается справедливым и для конечного участка светящей поверхности, так что во всех случаях проекция вырезки, определяющей телесный угол, может служить мерой освещенности. При неограниченных размерах горизонтальной светящей поверхности проекция занимает всю экваториальную плоскость площадью π и $E = L\pi = M$.

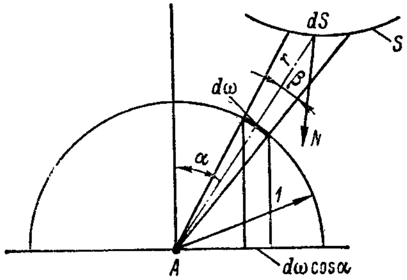

Рис. 3-24. Освещенность от большой поверхности

Выражение (3-26) интегрируется для некоторых частных случаев и приводит к довольно сложным формулам, на основании которых могут быть, однако, построены удобные для практического пользования графики. Так, на рис. 3-25 приведен предложенный Е. С. Ратнером график для расчета освещенности горизонтальной поверхности от горизонтального же светящего прямоугольника со сторонами a и b, установленного на высоте h и расположенного так, что точка A является проекцией одной из его вершин. График дает значения коэффициента q, на который надо умножить светимость поверхности M, чтобы получить освещенность E в функции отношений $a' = a : h$ и $b' = b : h$. Так как для поверхности,

неограниченно простирающейся во все стороны от точки A, $q = 1$, ясно, что при неограниченном увеличении a' и b' предельное значение $q = 25\%$.

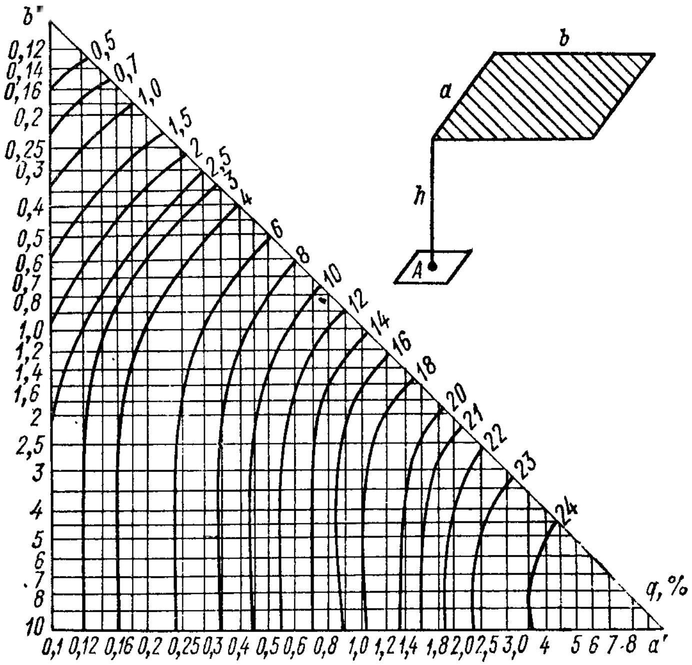

Рис. 3-25. График для расчета освещенности от горизонтального прямоугольника

График позволяет решить задачу определения освещенности и в точке, не совпадающей с проекцией одной из вершин.

В помещении размерами 10×10 м и высотой 4 м устроена потолочная панель 4×4 м. В панели установлено 20 ламп ЛБ-80 ($\Phi = 5220$ лм). Коэффициент полезного действия панели 0,6. Требуется определить освещенность точки A (рис. 3-26), создаваемую прямым светом панели.

Светимость панели

$$M = \frac{20 \cdot 5220 \cdot 0{,}6}{16} = 3900\ \text{лм/м}^2.$$

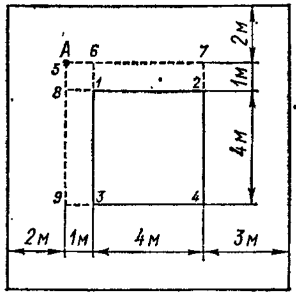

Рис. 3-26. Освещенность от светящейся панели

Так как точка A не совпадает с проекцией одной из вершин панели, вообразим последнюю дополненной до квадрата 5794. Определив освещенность от этого квадрата, мы должны вычесть освещенность от прямоугольников 5782 и 5693 и прибавить освещенность от квадрата 5681, так как иначе последняя окажется вычтенной дважды. Таким образом,

$$d_{1234} = q_{5794} - q_{5782} - q_{5693} + q_{5681}.$$

Определяя соответствующие отношения a' и b' (которую сторону принять за a и которую за b — безразлично) и находя по рис. 3-25 значения q, получаем

$$q_{1234} = 18 - 10 - 10 + 6 = 4\%,$$

откуда $E = 3900 \cdot 0{,}04 = 156$ лк.

Аналогичный график построен Е. С. Ратнером и для вертикального прямоугольника.

Существует и иное решение задачи определения освещенности от больших светящих поверхностей, причем произвольной формы, предложенное А. А. Гершуном.

Задача определения световых потоков, падающих от излучателей на поверхности (а через них — определение средней освещенности и приближенно, с помощью коэффициента z, минимальной освещенности), значительно сложнее и, можно сказать, многограннее, чем уже рассмотренная. Почти во всех случаях она решается приближенно, на основе следующих допущений, которые в дальнейшем особо не оговариваются:

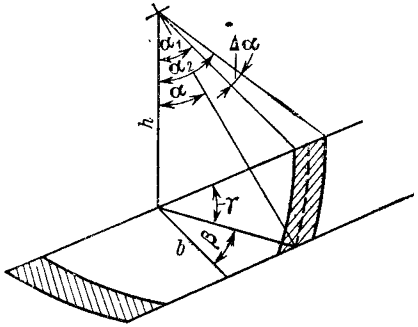

Рис. 3-27. Определение светового потока, падающего на полосу

1) все поверхности, участвующие в перераспределении светового потока, являются диффузными;

2) световой поток в пределах зоны, ограниченной определенными направлениями, распределен равномерно;

3) по каждой группе поверхностей помещения (потолок, стены, расчетная плоскость) световой поток также распределен равномерно.

В дальнейшем будем различать первичные потоки, непосредственно, без учета отражения от каких-либо поверхностей, падающие на данную поверхность, и соответствующие им коэффициенты первичного использования, а также установившиеся потоки, падающие на поверхность в результате отражения от поверхностей, и соответствующие им установившиеся коэффициенты использования. Первичные потоки и коэффициенты использования будут отмечаться штрихом (Φ', η').

В качестве первой задачи рассмотрим определение первичных потоков от излучателей с круглосимметричным светораспределением, падающих на полосу неограниченной длины, при размещении светильника, показанном на рис. 3-27. Круговая зона, ограниченная направлениями $\alpha_1 = \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}$ и $\alpha_2 = \alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}$ в пересечении с горизонтальной поверхностью дает кольцо, часть площади которого лежит в пределах освещаемой полосы.

Таблица 3-8

Круговая зона, ...°	Значение коэффициента использования η', %, при отношении b : h, равном							
	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
0—10	50	50	50	50	50	50	50	50
10—20	38	50	50	50	50	50	50	50
20—30	18	50	50	50	50	50	50	50
30—40	11,6	25	50	50	50	50	50	50
40—50	8	16,7	50	50	50	50	50	50
50—60	5,6	11,4	24	50	50	50	50	50
60—70	3,7	7,5	15,4	25	38	50	50	50
70—80	2,1	4,3	8,6	13	18	30	50	50
80—90	0,7	1,4	2,7	4,2	5,5	8,4	11,3	14,3

Отношение этой площади ко всей площади кольца, или, что то же, отношение $2\gamma : 360$, может быть принято за коэффициент первичного использования потока светильника, а так как $\gamma = \arcsin \frac{b}{h \operatorname{tg} \alpha}$, то

$$\eta' = \frac{\arcsin \frac{b}{h \operatorname{tg} \alpha}}{360}, \qquad (3\text{-}27)$$

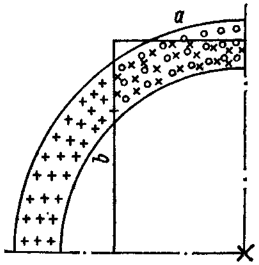

Рис. 3-28. Определение светового потока, падающего на квадрант

причем числитель выражается в градусах. Предельное значение $\eta' = 50\%$. Рассчитанные по формуле (3-27) значения η приведены в табл. 3-8. Предназначенные для практических расчетов таблицы желательно составлять для интервалов угла $\alpha = 5°$. При размещении светильников над осью полосы значения η' удваиваются; при размещении на площади полосы значения η' находятся отдельно для каждой стороны и суммируются; при размещении вне полосы последняя условно дополняется до соответствия рисунку с последующим вычетом значения η' для добавленной части.

Нетрудно применить данный способ и для определения первичного светового потока в помещении ограниченных размеров. На рис. 3-28 показан один из квадрантов такого помещения и одна из круговых зон, поток которой $\Phi_з$. Часть площади кольца, отмеченная кружками, соответствует потоку $\Phi_з \frac{\eta_a}{2}$, а крестиками, $\Phi_з \frac{\eta_b}{2}$, Сумма этих площадей больше, чем $\Phi_з : 4$, на величину искомого потока Φ_x, который входит в оба слагаемых. Отсюда

$$\Phi_з \frac{\eta_a + \eta_b}{2} = \frac{\Phi_з}{4} + \Phi_x \text{ и } \Phi_x = \frac{\Phi_з}{2}(\eta_a + \eta_b - 0{,}5). \qquad (3\text{-}28)$$

Расчеты по этой формуле производятся отдельно для каждой зоны и каждого квадранта.

Разработаны также способы определения потока, падающего на полосу от светильников с трубчатыми лампами, имеющих две плоскости симметрии. В общем случае, при использовании светильников, не имеющих плоскостей симметрии, поток приходится определять, разбивая полосу на участки, в пределах каждого из которых освещенность можно считать неизменной.

Коэффициент первичного использования светового потока совокупности круглосимметричных светильников, установленных в помещении, зависит от индекса помещения, характеристик светильника, и, в меньшей степени, от значения $\lambda = L : h$. Для их определения получили распространение таблицы, разработанные Джонсом и Нейдхартом, одна из которых для значения $\lambda = 0,4$ приводится ниже.

Таблица 3-9

Круговая зона, ...°	Значения коэффициента использования η′ при индексе помещения, равном									
	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
0—10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10—20	0,72	0,79	0,81	0,85	0,88	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96
20—30	0,57	0,67	0,73	0,79	0,83	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94
30—40	0,34	0,50	0,56	0,64	0,69	0,77	0,82	0,85	0,88	0,91
40—50	0,16	0,36	0,49	0,57	0,64	0,72	0,78	0,81	0,86	0,88
50—60	0,03	0,12	0,28	0,39	0,48	0,60	0,67	0,72	0,78	0,83
60—70	0	0	0,05	0,21	0,31	0,43	0,52	0,59	0,69	0,77
70—80	0	0	0	0	0	0,11	0,22	0,32	0,47	0,60
80—90	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,11

Для светильников с люминесцентными лампами, имеющих две плоскости симметрии, Эйнхорном предложен метод определения первичных потоков, при котором раздельно определяются коэффициенты использования в направлении продольной и поперечной плоскостей, произведение которых дает окончательный коэффициент использования. Применение этого метода потребовало бы, однако, коренного изменения принятой у нас практики расчета, так как таблицы не могли бы быть составлены с аргументом в виде индекса помещения и так как пришлось бы учитывать, ориентированы ли светильники вдоль или поперек продольной оси помещения. Произведенный анализ показал, что без существенной погрешности можно пользоваться и в этих случаях таблицами Джонса и Нейдхарта, понимая под силой света ее среднее значение для двух плоскостей и выполняя все дальнейшие расчеты как для круглосимметричных светильников. При этом ориентация светильников в помещении хотя и играет роль, но незначительную.

Выполним в качестве примеров некоторые расчеты для светильника, сила света которого при лампе 1000 лм задана значениями, указанными в табл. 3-10, где приведены также промежуточные расчеты.

1. Светильники с лампами накаливания 200 Вт (Ф = 2800 лм) установлены на высоте 8 м над осью полосы шириной также 8 м. Требуется определить расстояние между светильниками, при котором средняя освещенность полосы составит 4 лк при коэффициенте запаса 1,3.

Соответственно указанному размещению светильников коэффициент использования η′ определяем по табл. 3-8 для $b : h = 0,5$ и найденные значения удваи-

Таблица 3-10

α, ...°	Круговая зона, ...°	I_α, кд	Зональный телесный угол, ср	Зональный поток, лм	Коэффициент использования потока для		Полезный световой поток, лм, для	
					полосы (2η′)	помещения (η′)	полосы	помещения
5	0—10	180	0,095	17,1	1,0	17,1	1,0	17,1
15	10—20	210	0,283	59,4	1,0	59,4	0,85	50,5
25	20—30	245	0,463	113,4	1,0	113,4	0,79	89,6
35	30—40	265	0,628	166,4	0,5	83,2	0,64	106,5
45	40—50	190	0,774	147,1	0,334	49,1	0,57	83,8
55	50—60	90	0,897	80,7	0,228	18,4	0,39	31,5
65	60—70	60	0,992	59,5	0,15	8,9	0,21	12,5
75	70—80	30	1,058	31,7	0,086	2,7	0	0
85	80—90	10	1,092	10,9	0,028	0,3	0	0
			$\sum\Phi =$ = 868 лм				$\sum\Phi =$ = 352,5 лм	$\sum\Phi =$ = 391,5 лм

Примечание. Коэффициент использования потока лампы для помещения дается по Джонсу и Нейдхарту.

ваем. Как следует из таблицы, коэффициент использования потока светильников составляет 352 : 686 = 0,51, но коэффициент использования потока лампы (для нас единственно важный) 352 : 1000 = 0,35.

Так как согласно заданию на каждый метр длины полосы должен падать световой поток 1×8×4×1,3 = 41,6 лм, а полезный поток светильника с лампой 200 Вт составляет 2800×0,35 = 980 лм, то расстояние между светильниками должно составлять 980 : 41,6 = 23,5 м.

2. Если тот же светильник установлен в помещении с индексом $i = 1,5$, то, умножая зональные потоки на коэффициенты, взятые из табл. 3-9, получим, как указано в табл. 3-10, коэффициент первичного использования 0,39.

Для определения первичного потока, падающего от диффузно излучающей поверхности Q на освещаемую поверхность S, при любой форме и расположении обеих поверхностей, составляется дифференциальное выражение для элементарного потока, падающего от малого элемента dQ на малый же элемент dS, и интегрированием распространяется на полные поверхности Q и S. Интегрирование осуществимо для некоторых случаев. В частности, Е. Н. Яковлевым рассчитаны коэффициенты использования потока прямоугольника относительно параллельного и равновеликого ему прямоугольника, т. е. коэффициенты первичного использования потока потолка относительно пола. Эти данные приведены в табл. 3-11.

В той же таблице, по данным МЭИ, приведены такие же коэффициенты для случая, когда излучающая поверхность расположена над центром освещаемой и занимает около 1 : 5 ее площади, т. е. для случая, соответствующего представленному на рис. 3-26. Рассчитаны данные и для ряда других случаев.

Вышеупомянутое дифференциальное выражение для элементарного потока не изменится, если излучающей поверхностью

будет S, а освещаемой — Q. Это позволяет утверждать, что и весь поток, падающий от Q на S, равен потоку, падающему от S на Q, при условии, конечно, равенства светимостей. Так как выражения для коэффициента использования имеют вид:

$$\eta_{QS} = \frac{\Phi_{QS}}{MQ} \quad \text{и} \quad \eta_{SQ} = \frac{\Phi_{SQ}}{MS},$$

то получаем

$$\frac{\eta_{QS}}{\eta_{SQ}} = \frac{S}{Q}. \qquad (3\text{-}29)$$

Расчет по этому выражению носит название принципа Муна.

Таблица 3-11

i	Значение коэффициента использования потока η, %, прямоугольника	
	параллельного и равновеликого освещаемой поверхности	параллельного освещаемой поверхности, расположенного над ее центром и имеющего 1 ; 5 часть ее площади
0,5	20	22
0,6	24	28
0,8	33	40
1,0	42	48
1,5	56	65
2,0	63	77
3,0	73	88
4,0	79	93
5,0	81	96

Вопросы распределения световых потоков в условиях помещения рассмотрим на основе работ МЭИ применительно к схеме, представленной на рис. 3-29. Поток осветительных приборов распределяется в общем случае по трем поверхностям помещения: потолку, стенам и расчетной плоскости, которой, в частности может быть пол помещения. Для того чтобы избежать отдельного определения потока, падающего на верхнюю и нижнюю части стен, на уровне осветительных приборов проводится воображаемая плоскость $S_п = S_р$, принимаемая за условный потолок. Тогда за поток, падающий на потолок ($\Phi'_п$), принимается весь поток, излучаемый приборами в верхнюю полусферу; поток, первично падающий на расчетную поверхность ($\Phi'_р$), находится одним из описанных способов, первичный же поток на стены ($\Phi'_с$) будет разностью между всем потоком и двумя названными.

Схему можно считать универсальной. Так, если светильники установлены на потолке, ничего не изменится, кроме того, что условный поток совпадет с действительным; если излучает сам потолок, то $\Phi'_п = 0$, и т. д.

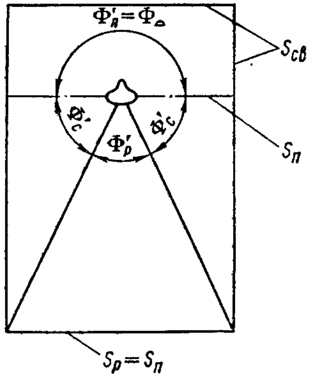

Рис. 3-29. Распределение светового потока по поверхностям помещения

Для определения установившихся потоков (что, собственно, и является конечной целью расчета) необходимо знать, какая часть первично упавшего на данную поверхность потока падает после отражения на остальные поверхности, т. е. коэффициенты первичного использования потока одной поверхности относительно другой, или, как их иногда называют, коэффициенты связи. Эти же коэффициенты могут быть использованы в тех случаях, когда та или иная поверхность рассматривается как первичный диффузный излучатель. Эти коэффициенты будем обозначать по схеме η'_{nm}, где n обозначает поверхность, посылающую поток, а m — поверхность, получающую этот поток. Так как каждая поверхность может посылать поток на две другие, таких коэффициентов может быть всего 6.

Считая, что данные для определения коэффициента $\eta'_{п.р}$ у нас уже имеются, в силу симметрии можем написать

$$\eta'_{р.п} = \eta'_{п.р}. \qquad (3\text{-}30а)$$

Очевидно далее, что

$$\eta'_{п.с} = 1 - \eta'_{п.р} \qquad (3\text{-}30б)$$

и в силу симметрии

$$\eta'_{р.с} = \eta'_{п.с}; \qquad (3\text{-}30в)$$

согласно принципу Муна

$$\frac{\eta'_{с.п}}{\eta'_{п.с}} = \frac{AB}{2h(A+B)} = \frac{i}{2},$$

откуда с учетом выражения (3-30б)

$$\eta'_{с.п} = (1 - \eta'_{п.р})\frac{i}{2}; \qquad (3\text{-}30г)$$

опять-таки в силу симметрии

$$\eta'_{с.р} = \eta'_{с.п}; \qquad (3\text{-}30д)$$

и наконец,

$$\eta'_{с.с} = 1 - 2\eta'_{с.п} = 1 - i(1 - \eta'_{п.р}). \qquad (3\text{-}30е)$$

Таким образом все коэффициенты оказываются определенными через $\eta'_{п.р}$ и i. Подчеркивается, что индекс определяется по высоте плоскости $S_п$ над расчетной поверхностью.

Из числа поверхностей помещения стены (в пределах между расчетной поверхностью и $S_п$) и все поверхности, лежащие выше $S_п$, образуют вогнутые поверхности, внутри которых имеют место многократные отражения, в связи с чем рассмотрим следующий случай.

Пусть на любую вогнутую незамкнутую поверхность падает световой поток Φ, причем площадь этой поверхности $S_{св}$, площадь ее «выходного отверстия» $S_п$, а коэффициент отражения $\rho_{св}$. В результате многократных отражений света в пределах самой поверхности на ней установится какой-то увеличенный поток $\gamma\Phi$, где γ — так называемый коэффициент многократных отражений. Во внешнее по отношению к поверхности пространство выйдет поток Φ, умноженный на коэффициент отражения $\rho_п$, который надо приписать фиктивной плоскости $S_п$ и который всегда меньше $\rho_{св}$, так как многократные отражения, увеличивая поток,

установившийся на данной поверхности, вместе с тем увеличивают и потери в ней на поглощение.

Пусть в результате распределения потока Ф по поверхности $S_{св}$ и многократных отражений в ее пределах поверхность приобретает светимость M, т. е. излучает поток $MS_{св}$. Но ту же светимость имеет воображаемая поверхность $S_п$, так как фактически через нее видна поверхность $S_{св}$, следовательно, через $S_п$ проходит поток $MS_п$. Отношение u этого потока к излучаемому является коэффициентом использования потока поверхности по отношению к внешнему пространству и определяется выражением

$$u = \frac{MS_п}{MS_{св}} = \frac{S_п}{S_{св}}. \tag{3-31}$$

Выражение (3-31) заслуживает быть названным «золотым правилом» светотехники. При проектировании самых разнообразных (но диффузно отражающих!) осветительных устройств: светильников, световых карнизов, ниш, панелей и т. п., коэффициент полезного действия этих устройств будет тем больше, чем ближе к единице отношение $S_п : S_{св}$, и даже такая мелочь, как округление углов углубленных в потолок панелей, повышает их эффективность.

После отражения потока Ф от поверхности $S_{св}$ его часть, равная $\rho_{св}Ф(1-u)$, падает на $S_{св}$ повторно, часть, равная $\rho_{св}^2Ф\,(1-u)^2$, — третий раз и т. д. Установившийся на поверхности поток

$$\gamma Ф = Ф\,[1 + \rho_{св}(1-u) + \cdots],$$

откуда γ есть сумма членов бесконечно убывающей геометрической прогрессии:

$$\gamma = \frac{1}{1-\rho_{св}(1-u)} = \frac{1}{1-\rho_{св}\left(1-\frac{S_п}{S_{св}}\right)}. \tag{3-32}$$

Теперь мы имеем основание написать равенство

$$Ф\rho_п = Ф\gamma\rho_{св}\,u,$$

откуда

$$\rho_п = \gamma\rho_{св}\,u = \frac{1}{\frac{S_{св}}{S_п}\left(\frac{1}{\rho_{св}}-1\right)+1}. \tag{3-33}$$

Если, например, отношение $S_{св} : S_п = 2$ и $\rho_{св} = 0{,}7$, то расчет дает $\rho_п = 0{,}54$, т. е. многократные отражения существенно уменьшают поток, проходящий через поверхность $S_п$.

Возвратимся к рис. 3-29. Пусть нам известны первичные потоки $Ф'_р$, $Ф'_с$, $Ф'_п$. В создании установившихся потоков на каждой из трех поверхностей участвует не только «свой» первичный поток, но в результате многократных отражений и два других, «свой» же поток увеличивается по той же причине. Для количественной оценки этого будем пользоваться коэффициентами вида k_{nm}, являющимися коэффициентами использования потока, первично падающего на поверхность n по отношению к поверхности m.

Тогда будут иметь место равенства:

$$\begin{aligned} Ф_р &= Ф'_р k_{р.р} + Ф'_с k_{с.р} + Ф'_п k_{п.р};\\ Ф_с &= Ф'_р k_{р.с} + Ф'_с k_{с.с} + Ф'_п k_{п.с};\\ Ф_п &= Ф'_р k_{р.п} + Ф'_с k_{с.п} + Ф'_п k_{п.п}. \end{aligned} \tag{3-34}$$

Разделив обе стороны этих равенств на Ф, получим окончательные выражения для определения коэффициентов использования:

$$\begin{aligned} \eta_р &= \eta'_р k_{р.р} + \eta'_с k_{с.р} + \eta'_п k_{п.р};\\ \eta_с &= \eta'_р k_{р.с} + \eta'_с k_{с.с} + \eta'_п k_{п.с};\\ \eta_п &= \eta'_р k_{р.п} + \eta'_с k_{с.п} + \eta'_п k_{п.п}. \end{aligned} \tag{3-35}$$

Вычисление коэффициентов k_{nm} произведено МЭИ [11], по материалам которого составлена табл. 3-12. Поскольку эти коэффициенты имеют исключительное значение при светотехнических расчетах, надо сделать некоторые дополнительные замечания.

Три из этих коэффициентов: $k_{п.\,п}$, $k_{с.\,с}$, $k_{р.\,р}$, всегда больше единицы, так как «свой» поток, падающий на поверхности, частично от них отражается и после отражения от других поверхностей возвращается на эти поверхности. Отметим, что даже общий коэффициент использования светового потока за счет многократных отражений может не только превысить к. п. д. светильников, но и быть большим единицы.

Для определения коэффициента использования подвесных светильников следовало бы каждый раз определять коэффициент отражения $\rho_п$ по формуле (3-33). Так как это довольно сложная операция, МЭИ при составлении таблиц введен дополнительный коэффициент $k'_{п.\,р}$. Будучи рассчитанным для среднего соотношения между расстоянием светильников от потолка ($h_с$) и расчетной высотой, он уже учитывает многократные отражения в верхней полости (то, что иногда называется «эффектом свода») и при использовании этого коэффициента за $\rho_п$ принимается коэффициент отражения физического, а не условного потолка. На остальные коэффициенты эффект свода влияет незначительно. Само собой, что при расчете таких установок отраженного освещения, как световые карнизы, напольные светильники и т. п., определение коэффициента $\rho_п$ по формуле (3-33) неизбежно.

В некоторых случаях коэффициенты k_{nm} приходится применять не к потокам, падающим на поверхности, а к потокам, ими излучаемым. Следует учитывать, что физически коэффициенты эти можно понимать как произведение коэффициента отражения данной поверхности на коэффициент использования отраженного потока, и если они вводятся к излучаемому потоку, то потери на отражение надо исключить. Если, например, по стенам помещения расположены искусственные окна, светящие отраженным или пропущенным светом, то для нахождения освещенности расчетной поверхности поток, исходящий от этих окон, надо умножить на $k_{с.\,р} : \rho_с$.

В § 3-2 и 3-3 коэффициент использования рассматривался как величина, заимствуемая из каталогов или справочников. Методика, рассмотренная в данном параграфе, прежде всего предназначена именно для определения коэффициентов использования, публикуемых в справочниках.

Так, выше мы выполнили определение коэффициента $\eta_р$ для помещения, имеющего индекс 1,5. Определим коэффициент использования светового потока того же светильника в том же помещении, считая, что светильник подвесной,

Таблица 3-12

i	$k_{п.р}$	$k'_{п.р}$	$k_{п.с}$	$k_{п.п}$	$k_{с.р}$	$k_{с.с}$	$k_{с.п}$	$k_{р.р}$	$k_{р.п}$	$k_{р.с}$	$k_{п.р}$	$k'_{п.р}$	$k_{п.с}$	$k_{п.п}$	$k_{с.р}$	$k_{с.с}$	$k_{с.п}$	$k_{р.р}$	$k_{р.п}$	$k_{р.с}$
	При коэффициентах отражения $\rho_п = 70\%$; $\rho_с = 50\%$; $\rho_р = 10\%$										При коэффициентах отражения $\rho_п = 50\%$; $\rho_с = 30\%$; $\rho_р = 10\%$									
0,5	24	18	91	110	19	158	16	102	3	14	14	9	52	103	8	126	8	101	2	11
0,6	28	22	81	110	21	152	18	102	4	14	16	12	47	104	10	124	8	101	3	10
0,8	36	29	68	110	24	145	20	102	5	12	21	16	41	104	11	121	10	102	4	10
1,0	41	35	60	110	26	139	22	103	6	10	25	20	36	104	12	118	11	102	5	8
1,5	50	44	45	110	31	129	24	104	7	8	31	26	28	104	16	114	12	102	6	7
2,0	54	50	36	110	34	122	26	104	8	7	35	31	23	105	17	111	14	103	7	6
3,0	60	57	25	110	38	116	27	106	8	5	40	36	16	105	19	108	15	104	8	4
5,0	66	64	16	108	41	108	28	106	10	4	44	42	10	105	20	105	16	104	9	2

П р и м е ч а н и е. Значения коэффициентов k_{nm} приведены в процентах.

в верхнюю полусферу направляет 130 лм ($\eta'_п = 0,13$) и что потолок, стены и расчетная поверхность помещения имеют коэффициенты отражения, соответственно, 50, 30 и 10%. Расчеты ведем в долях коэффициента использования [формула (3-35)], но с равным успехом можно вести их в люменах светового потока.

Из табл. 3-10 нам уже известно, что в нижнюю полусферу излучается 0,69 потока лампы, а на расчетную поверхность первично падает 0,39 этого значения. Следовательно, $\eta'_с = 0,69 - 0,39 = 0,30$. Из табл. 3-12 находим $k'_{п.р} = 0,26$; $k_{с.р} = 0,16$; $k_{р.р} = 1,02$.

Следовательно,

$$\eta = 0,13 \cdot 0,26 + 0,30 \cdot 0,16 + 0,39 \cdot 1,02 = 0,48.$$

Вернемся также к примеру, представленному на рис. 3-26, и определим среднюю освещенность пола, принимая $\rho_п = 70\%$, $\rho_с = 50\%$, $\rho_р = 10\%$.

Индекс помещения

$$i = \frac{100}{4(10+10)} = 1,25.$$

По табл. 3-11, интерполируя, находим $\eta'_р = 0,57$, значит, $\eta'_с = 1,0 - 0,57 = 0,43$; $\eta'_п = 0$. По табл. 3-12 коэффициенты $k_{р.р} = 1,04$; $k_{с.р} = 0,29$.

Так как полный поток панели $20 \cdot 5220 \cdot 0,6 = 62\,640$ лм, то $\Phi'_р = 62\,640 \times 0,57 = 36\,000$ лм и $\Phi'_с = 26\,600$ лм (цифры округлены).

Отсюда $\Phi_р = 36\,000 \cdot 1,04 + 26\,600 \cdot 0,29 = 45\,100$ лм, что при делении на площадь дает $E = 451$ лк, из которых прямым светом создается $36\,000 : 100 = 360$ лк.

Рассмотренная в данном параграфе методика позволяет решать большое число задач, в частности, в области расчета архитектурно-художественного освещения.

3-6. ПРОЖЕКТОРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Специфика расчета прожекторного освещения определяется основными его особенностями: наклонной установкой прожекторов и характером их светораспределения, в большинстве случаев не круглосимметричного и настолько концентрированного, что погрешность в определении направлений на 2—3°, вполне допустимая при использовании светильников, здесь существенно искажает результат. Следствием этих особенностей является и то, что если при расчетах осветительной установки со светильниками элементы выбираются до расчета и лишь корректируются по его результатам, то расчет прожекторного освещения является комплексной операцией, в процессе которой только и могут быть выбраны число и расположение прожекторов.

Для расчета прожекторного освещения предложено несколько способов. Дальнейшее изложение основано на работах Р. А. Сапожникова и автора.

Основными характеристиками прожекторов, как и других осветительных приборов, являются кривые силы света, но в данном случае они строятся не в полярных, а прямоугольных координатах, позволяющих выбрать для углов удобный масштаб. Светораспре-

деление задается, как правило, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, каждая из которых заключает ось прожектора: вертикальной и горизонтальной (последняя в рабочем положении прожектора фактически является наклонной), причем для вертикальной плоскости оно может быть различным для ее верхней и нижней половин. При большом различии между светораспределением в обеих указанных плоскостях необходимы данные для одной-двух промежуточных плоскостей. В отличие от расчета светового потока светильников при расчетах прожекторного освещения значения силы света даются не для условной лампы 1000 лм, а для номинального потока лампы, с которой используется прожектор.

В каталогах на прожекторы указываются также значения осевой силы света прожектора, угол рассеивания и коэффициенты полезного действия в пределах этого угла и полный к. п. д.

Под углом рассеивания 2α понимается угол между двумя направлениями плоскости, лежащими по разные стороны от оси, в которых сила света составляет 0,1 ее максимального (осевого) значения. Эта величина наглядно характеризует степень концентрации прожектором светового потока лампы, но отнюдь не следует считать, что за пределами угла рассеивания поток теряется бесполезно. Помимо оптической системы прожектора, степень концентрации потока определяется размером светящего тела источника, почему при прочих равных условиях осевая сила света прожектора больше при использовании ламп накаливания, чем при лампах ДРЛ. По той же причине прожекторы с трубчатыми лампами имеют в несколько раз больший угол рассеивания в горизонтальной плоскости, чем в вертикальной.

Возможная точность расчета прожекторного освещения в значительной степени обесценивается тем, что о характеристиках прожекторов можно говорить лишь как о средних вероятных. Они могут существенно отличаться не только у двух прожекторов одной серии, но и одного и того же прожектора с разными лампами одного типа и мощности.

Не следует также удивляться расхождению данных, публикуемых в разных источниках, так как при модернизациях конструкции прожекторов их характеристики несколько изменяются. Надо, наконец, иметь в виду, что из-за отсутствия у прожекторов лимбов с градусными делениями рассчитанные углы наклона и поворота при монтаже не могут быть точно осуществлены.

Рабочими характеристиками прожекторов при расчете освещения являются изолюксы на условной плоскости, перпендикулярной оси прожектора и удаленной от него на 1 м (рис. 3-30), отличающиеся от условных изолюкс для светильников в основном тем, что они строятся, хотя и по той же методике, но для номинального светового потока лампы. Ось ξ соответствует вертикальной, ось η — горизонтальной плоскости. Если светораспределение в обеих плоскостях одинаково, то изолюксы проводятся как дуги окружностей, если мало различается — как дуги эллипсов, при сильном же различии они строятся по точкам, соответствующим данным для основных и промежуточных плоскостей. В тех случаях когда в верхней и нижней частях вертикальной плоскости светораспре-

деление различно, изолюксы строятся для двух квадрантов, в остальных случаях — для одного квадранта.

Освещенность, определяемая по этим кривым, как и при использовании светильников, называется относительной освещенностью ε. Ее значения условны в том отношении, что не соответствуют освещенностям, которые фактически имели бы место на плоскости, удаленной от прожектора на 1 м, так как на расстоянии примерно до 30 м освещенность от прожекторов не подчиняется закону квадратов расстояний.

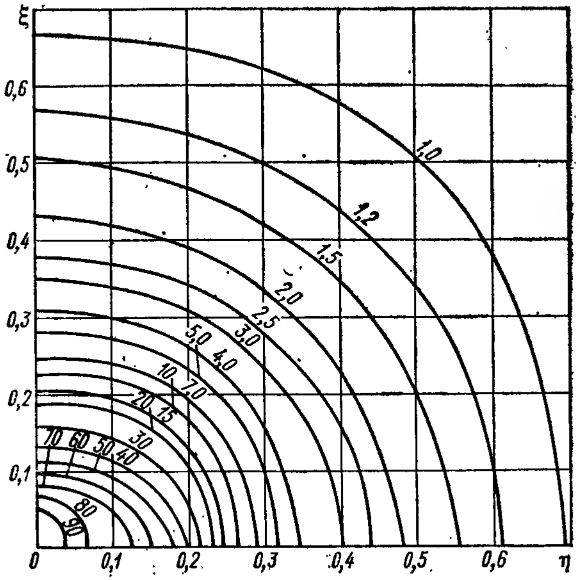

Рис. 3-30. Изолюксы на условной плоскости (в килолюксах) для прожектора ПЗС-45 с лампой 1000 Вт, 220 В

Чаще всего прожекторное освещение рассчитывается на горизонтальную освещенность: в некоторых случаях она является основной нормой, в других — имеет значение как горизонтальная, так и вертикальная освещенность, но создание первой обычно гарантирует по крайней мере не меньшее значение и второй.

Первичной задачей расчета является определение освещенности в точке при заданном расположении прожектора и координатах точки. Первое задается в данном случае высотой установки h и углом наклона оси θ, вторые — значениями x и y (рис. 3-31). При этом ось x является проекцией оси ε, а оси y и η — параллельны.

Требуется найти освещенность точки M горизонтальной плоскости, которой соответствует лежащая на том же луче точка m условной плоскости, с координатами ξ и η и освещенностью ε.

Проведем через M плоскость $MDBE$, перпендикулярную оси прожектора, т. е. параллельную условной плоскости. Освещенность точки M, рассматриваемой как лежащей в этой плоскости, обозначим $E_н$. Обозначив далее отрезок SB через ρ, получим $E_н : \varepsilon = 1 : r^2$, и, используя теорему о соотношении освещенностей общей точки двух плоскостей, получим

$$E = E_н \frac{h}{r} = \frac{\varepsilon h}{r^3}.$$

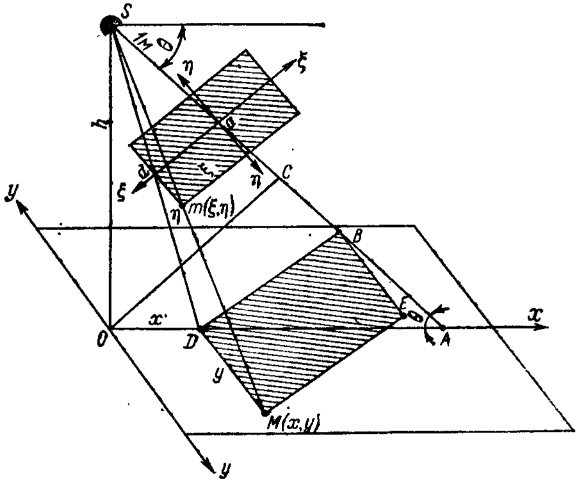

Рис. 3-31. Освещенность от прожектора

Из подобия треугольников Sdm и SDM, а также Sda и SDB можем найти $y : \eta = r : 1$; $y = \eta r$ и

$$\frac{\xi}{1} = \frac{DA \sin\theta}{r},$$

но так как $DA = h \operatorname{ctg}\theta - x$, то

$$\xi = \frac{h\cos\theta - x\sin\theta}{r}.$$

Наконец,

$$r = h\sin\theta + x\cos\theta.$$

Для упрощения расчетов введем новые переменные: $x' = x : h$ и $\rho = r : h$, что позволит придать полученным уравнениям следующий окончательный вид:

$$E = \frac{\varepsilon}{\rho^3 h^2} \text{ или } \varepsilon = E\rho^3 h^2; \quad (3\text{-}36)$$

$$y = \eta\rho h; \quad (3\text{-}37)$$

$$\xi = \frac{\cos\theta - x'\sin\theta}{\rho}; \quad (3\text{-}38)$$

$$\rho = \sin\theta + x'\cos\theta. \quad (3\text{-}39)$$

При вычислении ξ по формуле (3-38) знак не играет роли, так как любое направление осей на условной плоскости можно считать положительным, но следует помнить, что если график изолюкс на условной плоскости имеет два квадранта, то при $x' \sin\theta < \cos\theta$ точка m находится в нижнем квадранте, при обратном условии — в верхнем.

Смысл введения новых указанных переменных состоит в том, что ξ, ρ и ρ^3 оказываются функциями только двух переменных: θ и x', что дает возможность для их определения составить табл. 3-13. В каждой клетке этой таблицы верхнее число ξ, среднее ρ и нижнее ρ^3. При двухквадрантных графиках изолюкс на условной плоскости левее ломаной линии значения ξ следует принимать по нижнему квадранту.

Таблица 3-13

θ, °	Значения ξ, ρ и ρ^3 при значениях x', равных								
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3	4	5	6
12	1,25 0,70 0,34	0,65 1,19 1,66	0,40 1,70 4,7	0,25 2,20 10	0,18 2,6 19	0,12 3,1 31	0,04 4,1 70	0,01 5,1 132	0,05 6,1 225
14	1,17 0,73 0,38	0,60 1,21 1,77	0,36 1,7 4,9	0,23 2,2 10	0,14 2,7 19	0,08 3,2 31	0,00 4,1 70	0,05 5,1 132	0,08 6,1 222
16	1,09 0,79 0,43	0,56 1,24 1,89	0,32 1,7 5,1	0,19 2,2 11	0,10 2,7 19	0,04 3,2 32	0,04 4,1 70	0,09 5,0 130	0,12 6,0 220

Требуется определить освещенность от прожектора ПЗС-45 с лампой 1000 Вт, установленного на высоте 30 м при $\theta = 16°$ в точке $x = 45$ м, $y = 20$ м. Так как $x' = 1{,}5$, в табл. 3-13 находим $\xi = 0{,}32$, $\rho = 1{,}7$ и $\rho^3 = 5{,}1$.

По формуле (3-37) находим $\eta = 20 : (1{,}7 \cdot 30) = 0{,}39$, а в соответствии с рис. 3-31 $\varepsilon = 1700$ лк. Отсюда по выражению (3-36) $E = 1700 : (5{,}1 \cdot 900) = 0{,}37$ лк.

В практике подобные расчеты используются редко и почти исключительно в качестве поверочных. Ни при каком опыте нельзя заранее выбрать такое расположение комплекса прожекторов, чтобы обеспечить заданную минимальную освещенность, число же проб, необходимых для этого, превышает возможности «ручного» проектирования. Такой путь, однако, вполне посилен для ЭВМ, которая, перебрав громадное количество вариантов, может выбрать из них не только отвечающий нормам, но и оптимальный по показателям. «Ручное» же проектирование ведется по способам компоновки изолюкс или веера прожекторов.

На основе уже полученных соотношений легко рассчитать координаты геометрического места точек, имеющих одинаковую

горизонтальную освещенность, — изолюксы. Освещенность, на которую строится изолюкса, принято обозначать буквой e.

Для построения изолюксы освещенности e выбираются возрастающие значения x'. Для того чтобы точка M принадлежала изолюксе e, соответствующая ей точка m должна иметь $\varepsilon = e\rho^3h^2$. Так как задание x' позволяет найти ξ по таблице, по графику изолюкс на условной плоскости находится η, как абсцисса точки, имеющей ординату ξ и освещенность ε, после чего находится y, что определяет пару точек изолюксы, симметричных относительно оси x.

При расчете могут встретиться следующие случаи:

а. При малых x' значение ε меньше наименьшего значения на графике. Изолюкса при данном x' существует, но определить координаты ее точек нельзя.

б. В том же случае значение ε больше наибольшего значения на графике. При данном x' точек изолюксы не существует, но они могут появиться при увеличении θ.

в. При больших x' значение ε больше наибольшего значения на графике. Изолюкса кончилась, и дальше ее точек не будет.

В табл. 3-14 приводятся данные расчета для построения изолюксы 1 лк прожектора ПЗС-45, установленного на высоте 25 м при $\theta = 16°$.

Таблица 3-14

x	x'	ξ	ρ	ρ^3	ε	η	y
12,5	0,5	1,09	0,79	0,43	268	—	—
25	1,0	0,56	1,24	1,89	1 181	0,2	6,2
37,5	1,5	0,32	1,7	5,1	3 187	0,12	5,1
50	2,0	0,19	2,2	11	6 875	0.21	11,5
62,5	2,5	0,10	2,7	19	11 875	0,23	15,5
75	3,0	0,04	3,2	32	20 000	0,23	18,4
100	4,0	0,04	4,1	70	43 750	0,165	16,9
125	5,0	0,09	5,0	130	81 250	—	—

Характерные формы изолюкс показаны на рис. 3-32.

Данные о светораспределении прожекторов обычно сообщаются в пределах ограниченных углов с осью, что не позволяет построить часть изолюксы, примыкающую к мачте, однако все изолюксы являются замкнутыми кривыми.

Общий принцип расчета освещения путем компоновки изолюкс состоит в том, что план освещаемой плоскости заполняется сплошным слоем изолюкс освещенности $e = Ek : 2$, где E — нормированная освещённость и k — коэффициент запаса, причем изолюксы и план должны быть вычерчены в одинаковом масштабе. Тогда в точках касания или пересечения изолюкс создается освещенность $2e = Ek$, а на остальной части площади, охваченной изолюксой, как правило, бо́льшая освещенность.

Заполнить всю площадь изолюксами без перекрываний невозможно и частичный «нахлест» неизбежен. Наилучший результат достигается при использовании в пределах одной установки изолюкс для различных значений θ, с направлением в более удаленные от мачты районы лучей с меньшими значениями θ. Простейший пример компоновки изолюкс показан на рис. 3-33.

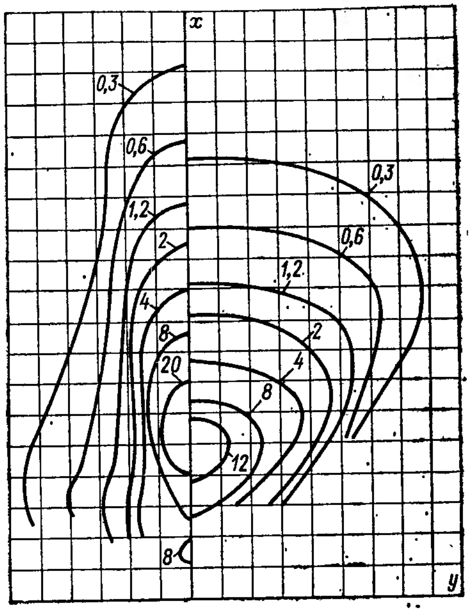

Рис. 3-32. Характерные формы изолюкс (слева — для прожекторов с обычной лампой накаливания, справа — с трубчатой лампой; мощность лампы, высота установки и угол наклона для обеих половин одинаковы)

Следует иметь в виду, что нормированная освещенность обеспечивается только в пределах площади, заштрихованной на рисунке, вблизи же куполов изолюкс освещенность меньше. Поэтому при компоновке изолюкс необходимо иметь также изолюксы освещенности Ek и следить, чтобы границы территории перекрывались этими изолюксами.

При освещении небольших площадей задача часто может быть решена таким размещением и наклоном прожектора, чтобы вся освещаемая площадь была охвачена изолюксой $e = Ek$, если же этого недостаточно, здесь допускается компоновка двух таких же изолюкс «след в след» (т. е. вплотную друг к другу).

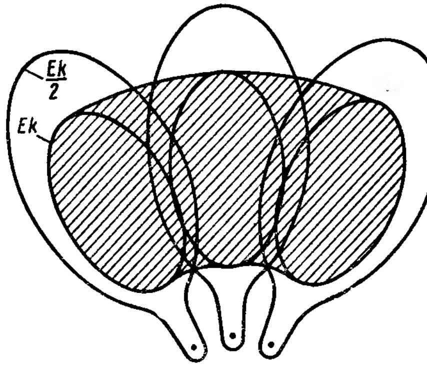

Рис. 3-33. Компоновка изолюкс

Определенные преимущества имеет «встречное» освещение площади с двух мачт, когда лучше просвечиваются тени. В этом случае сохраняется однослойная компоновка изолюкс, причем куполами изолюкс одной мачты желательно заполнять промежутки между куполами другой мачты.

При многих типах прожекторов и при малых углах θ вблизи мачты образуется «мертвое пространство» в пределах расстояния

от мачты $x = h \operatorname{ctg}(\gamma - \theta)$, где γ — защитный угол прожектора (для прожекторов с лампами накаливания — около 45°). Если нельзя удалить мачту на некоторое расстояние от освещаемой площади, то для освещения мертвого пространства дополнительно устанавливаются сильно наклоненные прожекторы или же светильники.

Если проследить за изменением площади q, охватываемой изолюксой (условно — «площадь изолюксы») какой-либо определенной освещенности e при изменении угла θ, то можно убедиться,

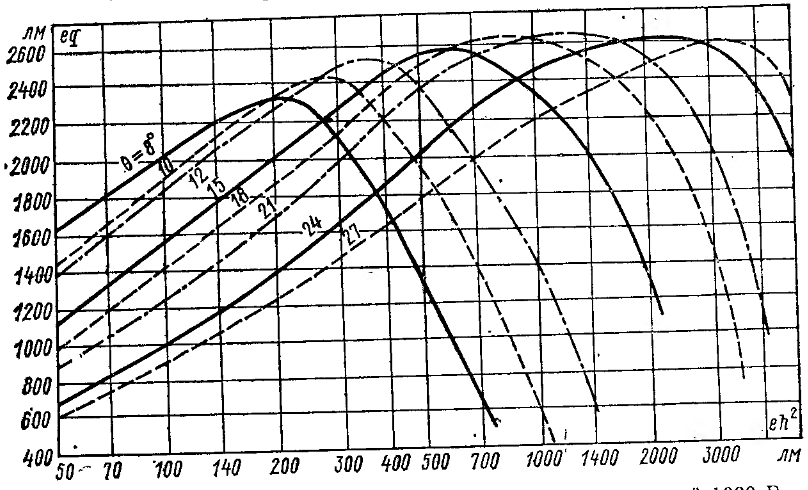

Рис. 3-34. Кривые $eq = f(eh^2)$ для прожектора ПЗС-45 с лампой 1000 Вт, 220 В

что при определенном значении θ она достигает максимума, и, конечно, значения θ следует по возможности выбирать такими, чтобы изолюксы нужной освещенности имели наибольшую площадь, хотя по условиям заполнения изолюксами конкретной площади от этого приходится и отступать.

Так как с изменением высоты h картина изолюкс остается себе подобной, удобно привести значения освещенности к единичной высоте и пользоваться аргументом eh^2. В функции этого аргумента путем непосредственных расчетов строятся для каждого θ кривые значений eq, которые при любой заданной освещенности e позволяют найти условия максимума площади. Такие кривые для прожектора ПЗС представлены на рис. 3-34.

Их максимум закономерно увеличивается с возрастанием угла θ, и можно показать, что теоретически наивыгоднейшей, но практически, конечно, абсурдной, является установка прожекторов при $\theta = 90°$ и на такой высоте, чтобы площадь данной изолюксы была наибольшей.

Пусть по условиям ограничения слепящего действия или по иным соображениям задана высота 25 м и требуется обеспечить освещенность $E = 5$ лк при $k =$

$= 1{,}5$, т. е. компоновать изолюксы $e = 3{,}75$ лк. Находим $eh^2 = 2343$ и из графика рис. 3-34 видим, что наивыгоднейшее значение угла $\theta = 24°$.

Чтобы не строить одинаковые изолюксы многократно, проектные организации выпускают и размножают альбомы изолюкс. Для сокращения объема этих альбомов изолюксы часто строятся для условной высоты 10 м.

Простейший способ использования этих изолюкс при любой высоте h состоит в том, что перечерчиваются не изолюксы, а контуры освещаемой площади. Если изолюксы даны в масштабе $1 : n$, то эти контуры должны быть перечерчены в масштабе $1 : \frac{nh}{10}$, расчет же должен производиться на нормированную освещенность, умноженную на $(0{,}1h)^2$.

С учетом изложенного расчет прожекторного освещения по способу компоновки изолюкс производится в следующем порядке.

Выбирается норма освещенности, тип прожектора и высота мачт, а также намечается расположение последних. Строятся или заимствуются из альбома изолюксы $Ek : 2$ и Ek для оптимальных и нескольких смежных значений θ. Эти изолюксы вырезаются из кальки, так чтобы вырезка включала и основание мачты. Точки основания мачты изолюксы накалываются на план освещаемого участка в месте намеченной мачты и путем поворота подбирается такая их компоновка, при которой достигается наилучшее заполнение площади при наименьшем числе прожекторов, после чего фиксируются углы наклона и поворота осей. В ряде случаев в процессе компоновки изолюкс выясняется необходимость изменить расположение мачт для получения лучших результатов.

Несложные рассуждения могут дать способ для предварительного определения мощности прожекторной установки.

Пусть для частного случая использования прожекторов ПЗС-45 вероятное наибольшее значение $eq = 2500$. Считая, что освещенность $e = Ek : 2$, получим $q = 5000 : Ek$. Если бы изолюксы заполняли план территории площадью S без пропусков и перекрываний, то потребовалось бы $N = S : q$ прожекторов. Вводя запас, равный примерно 1,4, на перекрывания и концы изолюкс выходящие за границы S, получим $N = \frac{1{,}4EkS}{5000}$. Так как мощность каждого прожектора 1000 Вт, то легко найти, что вероятная удельная мощность $w = 0{,}28Ek$.

Обобщая данные ряда расчетов, М. С. Дадиомов рекомендует для предварительного определения мощности формулу

$$w = \frac{Ek}{c\gamma}, \qquad (3\text{-}40)$$

где γ — световая отдача лампы, лм/Вт; c — коэффициент, равный при прожекторах с обычными лампами накаливания 0,27, с галогенными лампами КГ — 0,30, с лампами ДРЛ — 0,16 и лампами ДКсТ — 0,1—0,2. Формула, как нам кажется, дает несколько заниженные результаты.

При больших значениях освещенности задача не может быть решена способом компоновки изолюкс. Так, если для прожектора ПЗС-45 $h = 25$ м и $Ek : 2$ равно, например, 15 лк, то $eh^2 = 9300$. На графике $eq = f(eh^2)$ (рис. 3-34) нет такого значения, но ясно,

что оно привело бы к значению угла $\theta > 30°$, т. е. к очень малому радиусу действия прожекторов. Между тем ясно, что любая, по существу, задача разрешима путем уменьшения угла τ между смежными проекциями лучей прожекторов.

Анализ показывает, что как только τ становится не более 20—25°, освещенность становится равномерной вдоль любой дуги радиуса x' и ее снижения в месте стыка лучей двух прожекторов не происходит.

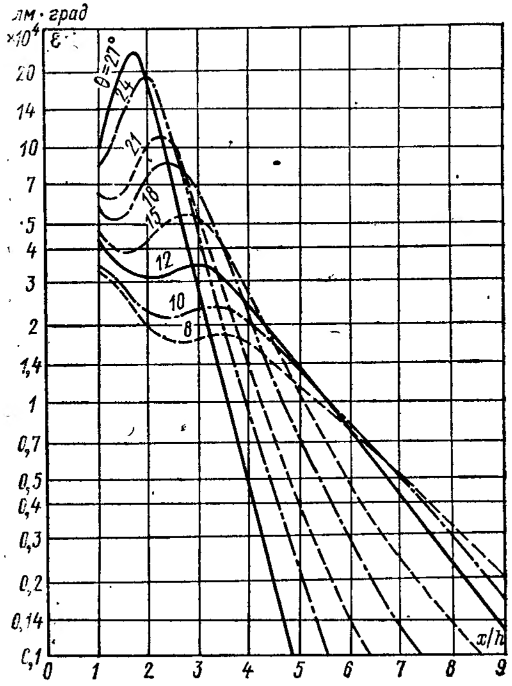

Рис. 3-35. Приведенная освещенность от веера прожекторов ПЗС-45 с лампой 1000 Вт, 220 В

Это позволяет рассматривать группу прожекторов с одинаковыми углами наклона и при равенстве углов τ как один сложный световой прибор — «веер прожекторов», создаваемая которым освещенность зависит от значений h, θ и x и обратно пропорциональна углу τ. Удобной характеристикой веера является освещенность, отнесенная к единичным значениям h и τ, т. е. так называемая приведенная освещенность $\mathcal{E} = eh^2\tau$. График этой величины строится в функции x' для различных значений θ (рис. 3-35).

При пользовании этими кривыми в контрольных точках определяются значения $\mathcal{E}$ от отдельных вееров, освещающих данную точку, затем находится $\sum \mathcal{E}$, искомым же является угол τ, находимый по формуле

$$\tau = \frac{\Sigma \mathcal{E}}{Ekh^2}. \qquad (3\text{-}41)$$

Угол между проекциями крайних осей, образующих веер, будем называть углом простирания веера.

Расчет освещения веерами прожекторов — сложная многовариантная задача, тем более ответственная, что она решается обычно для крупных установок. В полном объеме методика решения этой задачи здесь не может быть рассмотрена. Отметим только, что в целях создания наиболее экономичной установки (что в основном достигается повышением равномерности освещения) на одной и той же мачте могут быть установлены несколько вееров, отличающихся углами θ и τ, с различными стыкующимися или перекрывающими друг друга углами простирания. Так как вблизи границ вееров освещенность снижается, рекомендуется выбирать углы простирания крайних вееров с заходом на 10—15° за границы освещаемой площади.

Приводя простейший пример расчета по способу веера, подчеркиваем, что в этом случае, как и в других случаях расчета, надо проявлять определенную интуицию в выборе решений и избегать излишнего педантизма при обеспечении строго заданной освещенности в абсолютно наихудших точках, например в углах.

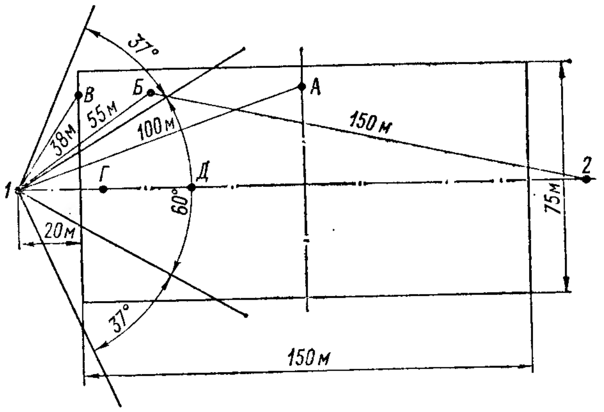

Рис. 3-36. Расчет освещенности от веера прожекторов, установленных на двух мачтах

На рис. 3-36 представлен план территории, в пределах которой надо обеспечить освещенность $E = 30$ лк при $k = 1{,}5$. Прожекторы ПЗС-45 установлены на двух мачтах высотой 25 м.

Начинаем расчет с точки A, равно освещаемой прожекторами обеих мачт. Для нее $x = 100$ м, $x' = 4$, и по графику приведенной освещенности видим, что она имеет максимум $2{,}7 \cdot 10^4$ лк при $\theta = 15°$. Однако сразу убеждаемся, что в районе приближенной к мачте *1* точки $Г$ в этом случае $\Sigma\mathcal{E}$ меньше, чем в точке A, которая становится не наихудшей. Поэтому увеличиваем угол θ до 18°, и тогда для точки A приведенная освещенность будет $2{,}3 \cdot 10^4$ лк, откуда по формуле (3-41)

$$\tau = \frac{2 \cdot 2{,}3 \cdot 10^4}{30 \cdot 1{,}5 \cdot 625} = 1{,}6°.$$

Можно полагать, что для района точек $Б$ и $В$ целесообразно применить веер с бо́льшим углом θ, без ущерба для точки A. Расчетом убеждаемся, что освещенность этих точек от прожекторов мачты *2* пренебрежимо мала. Для точки $Б$ при $x' = 2{,}2$ оптимальным является угол $\theta = 24°$ — его и выберем. Но видя из кривой, что в направлении к точке $В$ $\mathcal{E}$ уменьшается, примем для определения угла τ значение не $17 \cdot 10^4$, а $10 \cdot 10^4$ лк. Тогда

$$\tau = \frac{10 \cdot 10^4}{30 \cdot 1{,}5 \cdot 625} = 3{,}5°.$$

Для точки $В$ при $x' = 1{,}5$ освещенность $\mathcal{E} = 13 \cdot 10^4$, что обеспечивает норму освещенности. Для точки $Г$ от основного веера мачты *1* освещенность несколько больше, чем в точке A от вееров обеих мачт. Трудно устранимый максимум осве-